

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Marko Džoić

Zagreb, 2013.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

DIPLOMSKI RAD

Mentor:

Dr. sc. Suzana Jakovljević, dipl. ing.

Student:

Marko Džoić

Zagreb, 2013.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Zahvaljujem se u prvom redu i prije svih svojoj djevojci Maji bez koje ovog rada vrlo vjerojatno ne bi ni bilo te mojim roditeljima na strpljenju i podršci tokom svih ovih godina moga studiranja. Nadalje, još bih se želio zahvaliti gospodinu Alenu Kostanjevecu iz tvrtke Oprema-uređaji d.d. na spremnosti za suradnju i pomoć sa savjetima i dokumentacijom kada god su bili potrebni. Na kraju ne smijem zaboraviti i svoju mentoricu Suzanu Jakovljević s njenim usmjeravanjima i kritičkim primjedbama kako bi cijeli ovaj rad na kraju bio jedna smisljena cjelina.

Marko Džoić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje	
Datum	Prilog
Klasa:	
Ur.broj:	

DIPLOMSKI ZADATAK

Student: **Marko Džoić**

Mat. br.: 0035137225

Naslov rada na hrvatskom jeziku: **Trajnost matrice za izvlačenje cijevi rashladnih uređaja**

Naslov rada na engleskom jeziku: **Durability of dies for drawing cooling device pipes**

Opis zadatka:

Tankostijene cijevi od nehrđajućeg čelika imaju primjenu u raznim industrijama, npr. prehrambena, medicinska ili procesna, i osnovni su elementi u rashladnim i grijačim sistemima, kao i u ostalim granama široke potrošnje.

Najčešća primjena je u rashladnim uređajima za hlađenje i točenje piva i sokova te ostalih vrsta napitaka. Pri proizvodnji i kalibriranju cijevi pojavljuje se problem trajnosti matrica za izvlačenje odnosno kalibriranje.

U radu je potrebno:

- 1) Opisati tribosustav matrica – cijev.
- 2) Analizirati oštećenja tribosustava.
- 3) Usporediti različite matrice iz upotrebe.

Zadatak zadan:

19. rujna 2013.

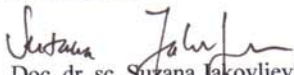
Rok predaje rada:

21. studenog 2013.


Predviđeni datum obrane:

27., 28. i 29. studenog 2013.

Zadatak zadao:


Doc. dr. sc. Suzana Jakovljević

Predsjednik Povjerenstva:


Prof. dr. sc. Franjo Cajner

SADRŽAJ

SADRŽAJ	I
POPIS SLIKA	III
POPIS TABLICA	IV
POPIS OZNAKA	V
SAŽETAK	VI
SUMMARY	VII
1. UVOD	1
2. ČELICI	2
2.1. Sistematizacija čelika	2
2.2. Djelovanje primjesa u čelicima	2
2.3. Djelovanje nemetalnih uključaka	3
2.4. Djelovanje legirnih elemenata	4
2.5. Korozijski postojani čelici (nehrđajući čelici)	5
2.5.1. Općenito o koroziji čelika	5
2.5.2. Uvjeti korozijske postojanosti čelika	6
2.5.3. Pojavni oblici korozije	7
2.5.3.1. Opća (jednolična) korozija	7
2.5.3.2. Posebni oblici korozije – selektivna, lokalna	7
2.5.4. Vrste nehrđajućih čelika	8
2.6. Tvrdi metali	9
3. PROIZVODNJA CIJEVI	12
3.1. Zavarivanje cijevi iz čeličnih traka	14
3.1.1. Kontrola čeličnog profila	14
3.1.2. Zavarivanje cijevi	14
3.1.3. Plazma zavarivanje, [4]	16
3.1.4. Kontrola tijekom postupka zavarivanja cijevi	18
3.2. Kalibriranje cijevi	19
3.2.1. Kalibriranje	19
3.2.2. Kontrola tijekom postupka kalibriranja cijevi	21
3.3. Žarenje cijevi	21
3.3.1. Rekristalizacijsko žarenje	22
3.3.2. Proces žarenja	24
3.3.3. Kontrola nakon žarenja i prije pakiranja	25
4. TRENJE I TROŠENJE	26
4.1. Trenje	26
4.2. Trošenje	27
4.2.1. Abrazija	27
4.2.2. Adhezijsko trošenje	29
4.2.3. Umor površine	30
4.2.4. Tribokorozija	31

5. INŽENJERSTVO POVRŠINA	32
5.1. Karakteristike	32
5.2. Podjela postupaka	34
5.3. Prevlačenje u parnoj fazi	38
5.3.1. CVD postupak	39
5.3.2. PVD postupak	40
5.3.2.1. Katodno otprašivanje	42
5.3.2.2. Isparavanje snopom elektrona	42
5.3.2.3. Toplinsko isparavanje	43
5.3.2.4. Isparavanje laserskim zrakama	43
5.3.2.5. Taloženje	44
6. EKSPERIMENTALNI DIO	45
6.1. Tvrdoća po Vickersu	47
6.2. Rezultati mjerenja tvrdoće	49
6.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM)	49
6.3.1. Priprema uzorka	50
6.3.2. Dijelovi skenirajućeg elektronskog mikroskopa	50
6.3.3. Stvaranje slike	52
6.4. SEM analiza	54
6.4.1. Kemijski sastav	54
6.4.2. Trošenje	57
6.4.2.1. Trošenje matrice	58
6.4.2.2. Oštećenje cijevi	63
7. ZAKLJUČAK	65
LITERATURA	66

POPIS SLIKA

Slika 1. Pojavni oblici korozije, [2].....	7
Slika 2. Shematski prikaz proizvodnje cijevi, [3]	13
Slika 3. Odmatalica i uređaj za zavarivanje, [3]	15
Slika 4. Uređaj za zavarivanje, [3]	15
Slika 5. Shematski prikaz plazme s prenesenim (a) i neprenesenim (b) lukom na osnovni materijal, [4]	17
Slika 6. Ulaz cijevi u matricu, [3]	20
Slika 7. Poprečni presjek matrice, [3]	20
Slika 8. Uređaj za ispitivanje nepropusnosti, [3]	21
Slika 9. Shematski prikaz hladnog valjanja lima te pojave teksture valjanja, [5].....	22
Slika 10. Rekristalizacijski dijagram elektrolitički pročišćenog željeza, [5]	24
Slika 11. Uređaj za žarenje, [3]	25
Slika 12. Trenje klizanja, [6].....	26
Slika 13. Mješovito trenje, [6].....	27
Slika 14. Jedinični događaj abrazije, [7]	28
Slika 15. Jedinični događaj adhezije, [7].....	29
Slika 16. Jedinični događaj umora površine, [7].....	30
Slika 17. Jedinični događaj tribokorozije, [7]	31
Slika 18. Shematski prikaz podjele postupaka površinske obradbe, [9]	33
Slika 19. Izrezani uzorci	45
Slika 20. Mikrostruktura tvrdog metala i debljina prevlake pod svjetlosnim mikroskopom ...	46
Slika 21. Mjerenje tvrdoće po Vickersu, [11]	48
Slika 22. Shematski prikaz skenirajućeg elektronskog mikroskopa, [13].....	51
Slika 23. Izvor i detektiranje podatkovnih signala, [14]	53
Slika 24. Reljefni prikaz mikrostrukture putem SEM-a.....	55
Slika 25. Linijska EDS analiza uzorka s TiAlN prevlakom.....	56
Slika 26. Linijska EDS analiza uzorka s TiN prevlakom.....	57
Slika 27. EDS analiza uzorka s TiAlN prevlakom.....	58
Slika 28. Kemijski sastav uzorka s TiAlN prevlakom	59
Slika 29. Oštećenje matrice s TiAlN prevlakom.....	60
Slika 30. EDS analiza uzorka s TiN prevlakom.....	61
Slika 31. Kemijski sastav uzorka s TiN prevlakom	62
Slika 32. Oštećenje matrice s TiN prevlakom.....	63
Slika 33. Tragovi trošenja na cijevima.....	64

POPIS TABLICA

Tablica 1. Rezultati mjerenja tvrdoće	49
---	----

POPIS OZNAKA

Oznaka	Jedinica	Opis
T_t	K	temperatura taljenja
d	mm	promjer ili dijagonala otiska
d_1	mm	dijagonala otiska
d_2	mm	dijagonala otiska
D	mm	promjer Brinellove kuglice
D_1	mm	promjer matrice
D_2	mm	radni promjer matrice
F	N	opterećenje
F_N	N	normalna sila
F_t	N	tangencijalna sila
h	mm	dubina otiska
h_1	mm	dobivena debljina lima
h_2	mm	početna debljina lima
H_1	mm	visina matrice
S	mm ²	površina otiska
v	m/s	brzina

SAŽETAK

U ovom radu analizirano je trošenje matrica za izvlačenje cijevi s različitim vrstama prevlaka. Bit će opisan proizvodni proces izrade cijevi s opisom svakog pojedinog procesa koji se koristi. Na samom kraju će biti provedeno ispitivanje te na temelju istih izneseni zaključci vezano za analizirana oštećenja promatranog tribosustava te izvršena usporedba različitih matrica iz upotrebe.

Ključne riječi: čelici, inženjerstvo površina, žarenje, plazma zavarivanje, PVD.

SUMMARY

In this paper will be analyzed wearing of matrices which are being used for exfiltration of pipes with different kinds of coating. Whole pipe production process will shortly be described along with each process used in it. In the end conducted analysis will be described and set out conclusion regarding analyzed defect of observed tribosystem. Also, comparison of different matrices from usage will be made.

Key words: steels, surface engineering, annealing, plasma welding, PVD

1. UVOD

Izrada ovog rada je pokrenuta u suradnji s tvrtkom Oprema-uređaji d.d. u cilju ispitivanja trošenja metalne prevlake na matrici za kalibriranje cijevi te usporedba različitih vrsta prevlaka i procjena njihove isplativosti.

Tvrtka iz koje je proizašla tvrtka Oprema-uređaji d.d. osnovana je 1948. godine te je kroz svoju povijest prolazila kroz razne promjene. Proizvodnja ugostiteljske opreme započela je u ljeto 1976. godine kada je formiran pogon za proizvodnju uređaja za hlađenje i točenje piva, [1].

Ovim radom će ukratko biti opisani postupak proizvodnje cijevi (sastoji se od zavarivanja, kalibriranja i žarenja cijevi), glavni prisutni mehanizam trošenja te opis nanošenja tankih tvrdih prevlaka u cilju povećanja trajnosti alata.

2. ČELICI

2.1. Sistematizacija čelika

Postoje raznovrsni pristupi, ovisno o tome s kojeg se stajališta promatraju čelici. Tako se čelici mogu karakterizirati obzirom na slijedeća obilježja:

- a) kemijski sastav: zajamčeni ili nezajamčeni sastav, ugljični ili legirani, prema vrsti legiranih elemenata, prema kvaliteti,
- b) mikrostruktura: feritni, feritno-perlitni, perlitni, martenzitni, bainitni, austenitni, ledeburitni...
- c) način proizvodnje: konverterski, elektropretaljivanjem, kisikovim konverterima, sekundarnom metalurškom obradom, pretaljivanje pod troskom,
- d) oblik i stanje: šipke, limovi, trake, cijevi, specijalni profili itd. te lijevani, toplovaljani, hladnovaljani, hladnovučeni, ljušteni, brušeni i polirani, kovani, toplinski obrađeni i sl.
- e) područje primjene: konstrukcijski čelici, alatni čelici itd.
- f) svojstva: povišena granica razvlačenja i vlačna čvrstoća, žilavost pri niskim temperaturama, oblikovljivost, rezljivost, otpornost na trošenje...

Svaki od čelika ima određenu kombinaciju navedenih obilježja te istovremeno pripada u više od navedenih skupina, [2].

2.2. Djelovanje primjese u čelicima

Za kvalitetu čelika nisu odlučujući, u većini slučajeva, prisutni zahtjevani legirni elementi, nego „neželjeni“ tzv. pratioci i nečistoće. To su: Si, Mn, N, P, S te nemetalni uključci sulfidnog, oksidnog ili silikatnog tipa. Male količine Cu, Cr, Ni, As, Sn dolaze u čelik iz otpada i iz rude. Osim vrste pratioca na različita svojstva čelika utječe, kod inače jednakog osnovnog kemijskog sastava čelika, njihova jednolika raspodjela ili mjestimična koncentracija.

Primjese u čeliku mogu biti elementi pratioci, skriveni i slučajni elementi. Prateće primjese su prisutne u svakom čeliku, a njihove masene udjele treba svesti na što je moguće manju mjeru.

Mangan je prateći element čiji je maseni udio obično od 0,2-0,8 %. Potječe iz rude ili iz dezoksidatora – feromangana. Vrlo je dobar dezoksidans, a ima i pozitivan utjecaj na smanjenje štetnog djelovanja sumpora koji stvara FeS u obliku sulfida.

Silicij je prateći element čiji je maseni udio kod nelegiranih čelika od 0,2-0,5 %, potječe iz rude ili dezoksidatora – ferosilicija.

Aluminij se dodaje radi dezoksidacije čelika. Povećava krhkost i smanjuje prokaljivost čelika.

Sumpor predstavlja nepoželjnu primjesu, a dolazi iz rude i produkata izgaranja. Najveći dopušteni maseni udio sumpora je 0,05 %. Sumpor sa željezom tvori nepoželjni sulfid FeS koji pri povišenim temperaturama dovodi do tzv. „crvenog loma“ i osjetnog smanjenja žilavosti. Viši maseni udio sumpora (do 0,3 %) može imati i pozitivan utjecaj ako se radi o čelicima koji trebaju imati povećanu obradljivost odvajanjem čestica.

Fosfor je nepoželjna primjesa i njegov maseni udio treba biti ispod 0,06 %. Fosfor čini s željezom supstitucijski kristal mješanac. Zbog vrlo male brzine difuzije fosfor izvanredno jako segregira. Povišenje masenog udjela fosfora uzrokuje pojavu krhkosti u hladnom stanju.

Dušik je uglavnom nepoželjna primjesa, a maseni udio je od 0,01-0,03 %. Već 0,01 % dušika povišuje granicu razvlačenja i čvrstoću, ali jako smanjuje deformabilnost i naročito udarni rad loma. Prisutnost dušika izaziva pojavu starenja i to naročito kod hladno deformiranih čelika čiji je rezultat povišena čvrstoća i smanjena žilavost.

Vodik je jedan od elemenata s najmanjim promjerom atoma pa je stoga brzina difuzije u željezo vrlo visoka. Vodik uzrokuje pad žilavosti iako čvrstoća ne raste, ta se pojava naziva „vodikova krhkost“.

Kisik nije pri normalnoj temperaturi topiv u željezu. Slično djelovanju dušika i vodika, prisutnost kisika povišuje krhkost čelika, [2].

2.3. Djelovanje nemetalnih uključaka

Količina, vrsta i raspodjela u čeliku pristunih nemetalnih uključaka određuju daljnja svojstva oblikovljivosti i otpornosti na propagaciju pukotine, odnosno otpornosti na lom.

Uključci mogu biti oksidne, sulfidne ili silikatne vrste. Pojednostavljeno, uključci se mogu prema obliku podijeliti na okrugle, poligonalne i izdužene. U njihovoj blizini dolazi do koncentracije naprezanja pri djelovanju vanjskog opterećenja.

Osim MnS koji se može razvaljati, ostali uključci su više ili manje tvrdi i krhki. Prisutnost uključaka smanjuje žilavost i dovodi do izrazite anizotropnosti svojstava čvrstoće i duktilnosti čelika, [2].

2.4. Djelovanje legirnih elemenata

Niti jedna druga skupina materijala ne može legiranjem u tako širokom opsegu mijenjati svojstva kao čelik.

Legirani čelik sadrži osim željeza i ugljika jedan ili više legirnih elemenata. Promjene svojstava koje se dobivaju legiranjem mogu se samo općenito naznačiti. Točnije predviđanje svojstava u pravilu nije moguće jer se djelovanje pojedinih elemenata ne može zbrajati. Često je prisutno međudjelovanje elemenata s ugljikom ili sa željezom ili pak između legirnih elemenata. Čelik se legira određenom količinom nekog elementa da bi se dobilo traženo svojstvo ili kombinacija svojstava. Neminovno se legiranjem neka svojstva i pogoršavaju.

Čelici se prema masenim udjelima legirnih elemenata uobičajeno dijele na:

- niskolegirane (s udjelima legirnih elemenata do 5 %) i
- visokolegirane (s masenim udjelom barem jednog legirnog elementa više od 5 %).

Legirani čelici se primjenjuju u onim slučajevima gdje se traže neka istaknuta svojstva koja se ne mogu postići s nelegiranim čelicima.

Utjecaji pojedinih elemenata na svojstva su slijedeći:

Mangan (Mn) – kao što je već opisano, mangan djeluje dezoksidirajuće, a na sebe veže i sumpor, povisuje granicu razvlačenja kod konstrukcijskih čelika, znatno poboljšava prokaljivost čelika, proširuje područje austenita.

Silicij (Si) – slično kao i mangan silicij je dobar dezoksidator pa se kao takav rabi pri proizvodnji čelika. Povisuje čvrstoću i otpornost na trošenje, povisuje granicu elastičnosti i dinamičku izdržljivost, blago povećava prokaljivost čelika.

Krom (Cr) – jak karbidotvorac i tvori tvrde karbide od cementita. Karbidi povisuju otpornost na pritisak i otpornost na abrazijsko trošenje. Krom u čeliku djeluje na smanjenje toplinske vodljivosti i toplinske rastezljivosti. Uz monofaznu mikrostrukturu i više od 12 % Cr u čvrstoj otopini čelika dobiva se potpuna korozijska postojanost.

Nikal (Ni) – izraziti gamageni element tako da su austenitni nehrđajući čelici uobičajeno legirani s niklom. Ne tvori karbide nego se otapa u rešetci željeza. Povišuje žilavost i pri niskim temperaturama. Smanjuje toplinsku vodljivost i toplinsku rastezljivost čelika.

Volfram (W) – jak karbidotvorac, omogućuje povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, a u manjoj mjeri i žilavosti. Djeluje povoljno na čvrstoću i otpornost na trošenje u toplom stanju te sprječava porast zrna pri povišenim temperaturama.

Molibden (Mo) – u pravilu se kombinira s drugim legirnim elementima. Utječe na povišenje granice razvlačenja i vlačne čvrstoće, kao i granice puzanja. Povoljno djeluje na formiranje sitnozrnate mikrostrukture i na povećanje prokaljivosti, jak karbidotvorac.

Vanadij (V) – jak karbidotvorac, povišuje tvrdoću i otpornost na trošenje pri normalnim i povišenim temperaturama, usporava rast zrna pri povišenim temperaturama, povišuje granicu razvlačenja, zbog cijene kombinira se s drugim elementima.

Kobalt (Co) – rastvara se u rešetci željeza te proširuje austenitno područje, usporava rast zrna pri povišenim temperaturama, omogućuje postojanost mikrostrukture te povišuje čvrstoću pri povišenim temperaturama.

Titan (Ti) – ima jak afinitet prema kisiku, ugljiku, dušiku i sumporu. Najjači karbidotvorac koji se teško raspada pri povišenim temperaturama. Djeluje na sužavanje austenitnog područja.

Aluminij (Al) – najčešće se primjenjuje kao element za dezoksidaciju, veže na sebe dušik i time smanjuje opasnost od pojave starenja, jako sužava austenitno područje, ne doprinosi poboljšavanju mehaničkih svojstava čelika, [2].

2.5. Korozijski postojani čelici (nehrđajući čelici)

2.5.1. Općenito o korozijskim čelika

Korozija je spontano razaranje materijala pod djelovanjem okolnog medija – plina, kapljevine ili krutih agresivnih čestica, a zbog kemijskih ili elektro-kemijskih procesa.

Kemijska korozija nastaje djelovanjem vrućeg i suhog zraka i plinova ili neelektrolita kao npr. benzin ili aceton na površinu čelika, čime dolazi do kemijskih reakcija, pretežno oksidacije.

Elektrokemijska korozija razvija se uz postojanje elektrolita (vodljive kapljevine ili vlažni plinovi) pri čemu se korodirani metal ponaša kao anoda i u obliku iona ulazi u otopinu. Elektrokemijski proces nastupa kada postoji razlika elektropotencijala dvaju kratkospojenih galvanskih elemenata, npr. dva različita metala u elektrolitu, različiti mikrostrukturni konstituenti ili nehomogenosti u strukturi metala.

Kriteriji za utvrđivanje potrebne otpornosti na koroziju jesu:

- dopušteni stupanj zagađenja česticama u uporabi,
- predviđena ili tražena trajnost konstrukcije,
- korozijske karakteristike okolnog medija i
- posljedice i rizici od djelovanja korozije.

Korozijska postojanost je svojstvo otpornosti materijala na djelovanje okolnog medija. Korozijski je postojaniji onaj materijal kod kojeg, u jednakim vanjskim uvjetima, dolazi do manje intenzivnog razaranja na površini ili do neželjenih promjena mikrostrukture.

Korozijska postojanost procjenjuje se i mjeri preko: gubitka mase (debljine) i volumena, promjene mehaničkih i ostalih svojstava tijekom korozijskog djelovanja, opažanja pojava površinskih oštećenja ili strukturnih promjena po presjeku kao i na druge načine [2].

2.5.2. Uvjeti korozijske postojanosti čelika

Proces otapanja (korodiranja) materijala povezan je sa sposobnošću pasiviranja površine, tj. stvaranja tanke guste zaštitne prevlake. Na intenzivnost pasivacije čelika najviše utječe maseni udio kroma i drugih legiranih elemenata koji moraju biti otopljeni u kristalu mješancu željeza. Maseni udio ugljika također djeluje na korozijsku postojanost. Što je viši % C, to je veća opasnost od stvaranja karbida, posebno kromovih, čime se osiromašuje čvrsta otopina na legiranim elementima.

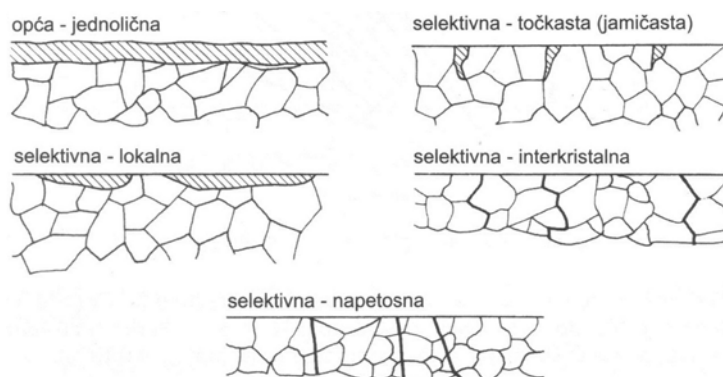
Da bi čelik bio potpuno korozijski postojan, moraju istovremeno biti ispunjena dva uvjeta:

1. pasivnost čelika – čelik mora sadržavati minimalno 12 % Cr i to u čvrstoj otopini

2. homogena monofazna mikrostruktura – da bi se izbjegla opasnost nastanka lokaliteta čiji je elektropotencijal različit od potencijala osnovne mase čelika, tj. opasnost pojave galvanskih članaka u strukturi, korozijski postojeći čelici teorijski bi morali imati potpuno feritnu (F), austenitnu (A) ili martenzitnu (M) mikrostrukturu bez karbida, oksida ili drugih intermetalnih faza, [2].

2.5.3. Pojavni oblici korozije

Osnovni pojavni oblici korozije na čelicima su shematski prikazani na slici 1.



Slika 1. Pojavni oblici korozije, [2]

2.5.3.1. Opća (jednolična) korozija

Ovo je najčešći i najrašireniji, ali i najmanje opasan oblik korozije, a nastupa jednolično po cijeloj površini dijela. Opću koroziju uobičajeno nazivamo „hrđanje“.

Čelik u atmosferi zbog različitih vodenih otopina, kondenzirajućih i suhih plinova korodira tim jače što je viši % C. Ako su ispunjena prije navedena dva temeljna uvjeta antikorozivnosti, čelik će biti potpuno postojan na opću koroziju, [2].

2.5.3.2. Posebni oblici korozije – selektivna, lokalna

Kod čelika koji se smatraju korozijski postojanim naročito na opću koroziju, mogu nastupiti neki posebni korozijski procesi. Oni mogu biti mnogo opasniji od opće korozije jer nisu toliko uočljivi i odvijaju se u postrojenjima i uređajima kemijske, prehrambene, petrokemijske i drugih odgovornih industrijskih postrojenja.

Selektivna korozija pojavljuje se mjestimično na površini i širi se prema unutrašnjosti presjeka dijela, ili pak započinje negdje unutar presjeka što je još neugodnije jer nije vidljiva.

1. Točkasta – jamičasta („pitting“) korozija

Nastupa na brojnim nepredvidivim lokalitetima, a ne po cijeloj površini, a očituje se malim jamicama koje s vremenom prerastaju u rupice.

Uzrok ovoj vrsti korozije je u lokalnim nehomogenostima u strukturi ili kemijskom sastavu materijala. Uz postojanje elektrolita (vodene otopine, vlažni plinovi i sl.) doći će do mikroelektrolize zbog razlike potencijala pojedinih područja u strukturi ili materijala u spoju. Odnosnje materijala je uvijek s onog dijela koji se ponaša kao anoda.

2. Kontaktna korozija

Ako se u agresivnom mediju (elektrolitu) nalaze u dodiru dva različita metala, doći će do stvaranja galvanskog članka, pri čemu će više korodirati onaj element koji se ponaša kao anoda. Ova vrsta korozije nastupa zbog razlike elektropotencijala ta dva metala, a ta vrijednost ovisi o vrsti materijala i vrsti agresivnog medija.

3. Interkristalna korozija

Predstavlja posebno opasan oblik korozije jer napreduje nevidljivo duž granica kristalita (zrna) čime se izaziva razaranje metalne veze među kristalitima u mikrostrukturi čelika i konačno raspad cijelog dijela.

4. Napetosna korozija

Nastupa kada je dio istovremeno izložen djelovanju agresivnog medija i vlačnog naprezanja. Ovaj tip korozije nastupit će najčešće na hladno deformiranim lokalitetima jer tamo zaostaju napetosti (zaostala naprezanja).

Pukotine napreduju okomito na smjer vlačnog opterećenja, a šire se intrakristalno ili transkristalno, a ne po granicama zrna, [2].

2.5.4. Vrste nehrđajućih čelika

- **Feritni čelici**

Sadrže $< 0,1 \%$ C i 13-17 % Cr. Postojani prema oksidirajućim kiselinama i neosjetljivi na plinove koji sadrže sumpor, manje su postojani prema kloridnim otopinama (morska voda), nisu osjetljivi na pojavu napetosne korozije čak i u kloridnim otopinama.

- **Superferitni čelici**

Povišenjem čistoće sastava čelika pročišćavanjem u vakuumskim pećima i u elektronskom mlazu, kao i sniženjem % C, povišenjem % Cr te legiranjem s Mo i Ni kao i Ti ili Nb, mogu se poboljšati neka od loših svojstava feritnih čelika.

- **Martenzitno-feritni čelici**

Sadrže do 0,2 % C i 13-17 % Cr. Optimalna svojstva postižu u kaljenom i visokopopuštenom stanju. Njihova je čvrstoća, tvrdoća i otpornost na trošenje viša od feritnih čelika, ali im je zato manja korozijska postojanost. Postojani su na djelovanje vode, vodene pare i vlažnog zraka.

- **Martenzitni čelici**

Zbog potrebe zakaljivanja imaju povišen maseni udio ugljika (0,15-1 % C) te u pravilu preko 13 % Cr. Moguće je legiranje s Mo i Ni. Optimalna mehanička svojstva i korozijsku postojanost postižu kaljenjem na zraku ili u ulju i naknadnim popuštanjem.

- **Mekomartenzitni čelici**

Radi se o niskougljičnim (< 0,1 % C) martenzitnim čelicima kod kojih se smanjenje mehaničkih svojstava zbog sniženja masenog udjela ugljika nadomješta legiranjem s Cr, Ni i Mo. Dobra im je postojanost na opću koroziju, ali slaba na jamičastu. Pripadaju skupini visokočvrstih čelika.

- **Austenitni i austenitno-feritni čelici**

Radi se o visokolegiranim čelicima s Cr i Ni koji proširuju austenitno područje sve do normalnih temperatura. Sniženjem udjela ugljika postiže se povećana otpornost na pojavu interkristalne korozije. Dodavanjem dušika kao gamagenog elementa može se donekle zamijeniti skuplji nikal, a istovremeno ublažuje alfabeno djelovanje molibdena te povećava otpornost na jamičastu koroziju. Povišenjem mehaničkih svojstava ujedno se poboljšava i otpornost na napetosnu koroziju.

- **Austenitno-feritni (duplex) čelici**

Čelici iz ove skupine nemaju monofaznu mikrostrukturu, nego dvofaznu austenitno-feritnu s 40-60 % ferita. Na taj se način odstupilo od nužnog uvjeta postojanosti na opću koroziju, ali je zato povećana postojanost na napetosnu koroziju u kloridnom okolišu. Vrlo je velika postojanost na jamičastu koroziju, [2].

2.6. Tvrđi metali

Tvrđi metali pripadaju u skupinu neoksidnih keramika. Za razliku od ostalih neoksidnih keramičkih materijala, kod tvrdih metala izražena su metalna svojstva. Njihova toplinska i električna vodljivost kao i druga svojstva dokazuju njihov metalni karakter.

Mikrostruktura tvrdih metala sastoji se od visokog udjela karbida volframa, titana i tantala koji su najčešće međusobno povezani koblatom.

Tvrđi metali imaju slijedeća dobra svojstva:

- visoko talište,
- visoku tvrdoću i otpornost na trošenje,
- visok modul elastičnosti, visoku vlačnu čvrstoću i čvrstoću na povišenim temperaturama,
- dobru postojanost na temperaturne promjene,
- otpornost na koroziju,
- visoku toplinsku i električnu vodljivost.

Karbidi su nositelji tvrdoće i otpornosti na trošenje, dok vezni metal osigurava žilavost višefaznog materijala.

Tvrđi metali primjenjuju se za izradu:

- reznih alata,
- alata za probijanje, duboko vučenje i provlačenje žice,
- dijelove strojeva (valjaka, izmjenjivih košuljica, cilindara, turbinskih lopatica itd.).

Najvažnije područje primjene tvrdih metala je uporaba za rezne alate u obradi materijala odvajanjem čestica. Tvrđi metali za rezne alate podijeljeni su u tri skupine:

- **tvrdi metali grupe K** prikladni su za obradu materijala s kratkom strugotinom kao što su: lijevovi na bazi željeza, porculan, kamen, drvo i tvrdi polimerni materijali. Sastav im je: oko 90 % volframova karbida (WC), do 4 % titanova karbida (TiC) i/ili tantalova karbida (TaC), ostatak kobalt (Co). Kod obrade žilavih materijala kao što je čelik stvaraju se naljepci i izjedenost, što je posljedica navarivanja strugotine na rezne oštrice reznog alata,
- **tvrdi metali grupe M** za obradu svih materijala, sadrže 80-85 % WC i do 10 % TiC i/ili TaC, ostatak Co. Mogu se upotrijebiti za obradu čelika do srednjih brzina rezanja,
- **tvrdi metali grupe P** imaju do 43% TiC i TaC. Prikladni su za obradu materijala s dugom strugotinom pri čemu su moguće, ovisno o vrsti tvrdog metala i vrsti obrade, različite brzine obrade.

Povećana otpornost na trošenje, kod istovremeno dobre žilavosti, postiže se nanošenjem tankih slojeva TiC, TiN, TiCN ili Al_2O_3 na rezne bridove tvrdih metala. Usporedi li se trošenje (širina trošenja slobodne površine i erozija) rezne pločice bez zaštitnog sloja i sa zaštitnim slojem dobiva se slijedeći redoslijed po rastućoj otpornosti: pločica bez sloja, TiC, TiN. Dakle, unatoč višoj tvrdoći TiC, TiN se manje troši.

Slojevi debljine 5-15 μm nanose se ili kemijskom reakcijom iz plinovite faze (CVD postupak) ili djelovanjem iona u elektrostatičkom polju (PVD postupak), [2].

3. PROIZVODNJA CIJEVI

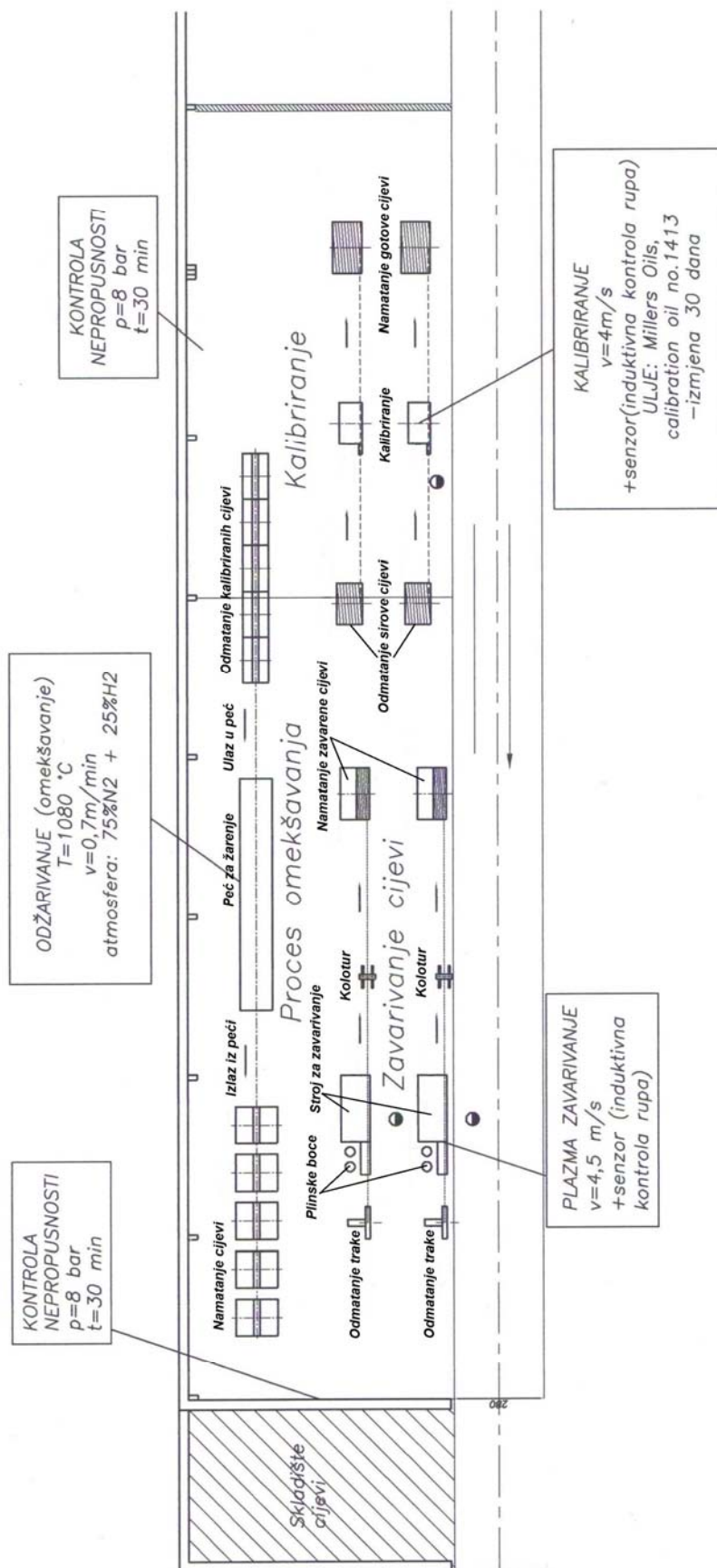
Proizvodnja čeličnih cijevi je jedan zasebni dio ukupne proizvodnje uređaja. Proces proizvodnje cijevi može se podijeliti na tri slijedne operacije:

1. zavarivanje cijevi iz čeličnih traka,
2. kalibriranje zavarene (sirove) cijevi i
3. žarenje cijevi u indukcijskoj peći.

Shematski prikaz proizvodnje cijevi može se vidjeti na slici 2 odnosno redosljed radnih operacija u procesu proizvodnje cijevi, [3].

OPREMA UREDJAJI d.d.

Skica proizvodnje cijevi



Slika 2. Shematski prikaz proizvodnje cijevi, [3]

3.1. Zavarivanje cijevi iz čeličnih traka

Izrada cijevi se provodi iz čeličnih traka od materijala AISI 304L (X2CrNi19) te AISI 316L (X2CrNiMo17) koje se nalaze namotane na kolutovima, [3].

3.1.1. Kontrola čeličnog profila

Vizualnim pregledom utvrđuje se opći izgled koluta s trakom zbog eventualnih oštećenja ili zamašćenosti površine trake na način da se odreže uzorak trake sa namotanog koluta i na radnom stolu mjerenjem utvrdi da li traka dimenzijski odgovara zahtjevima. U slučaju da postoje oštećenja površine trake u smislu ogrebotina ili mrlja potrebno je provjeriti izgled površine pod mikroskopom.

Opći izgled trake mora zadovoljavati kriterije u smislu eventualnih oštećenja ili zamašćenosti površine trake, dimenzije trake (širina, debljina i visina srha) moraju biti u granicama tolerancija te stanje i kvaliteta površine trake mora odgovarati normi AISI 2B ili BA, [3].

3.1.2. Zavarivanje cijevi

Proces se izvodi na stroju koji na sebi ima ugrađen plazma uređaj za zavarivanje, slika 3. Optimalni električni luk postiže se namještanjem položaja plamenika pomoću navojnih vretena, te regulacijom parametara na uređaju (jakost struje, protočne količine zaštitnog i gorivog plina, brzina zavarivanja...). Zavarena cijev koja izlazi iz zavarivačice namata se na kolut pomoću posebnog uređaja (namatalice) zbog olakšane manipulacije za daljnji proces proizvodnje.



Slika 3. Odmatalica i uređaj za zavarivanje, [3]

Kolut s čeličnom trakom potrebno je postaviti na odmatalicu odakle se traka uvodi na uređaj za zavarivanje, slika 4. Bitna stvar za napomenuti je kako je potrebno očistiti sve rollice za formiranje cijevi, a rashladnu komoru ispuhati komprimiranim zrakom kako bi se u što većoj mjeri smanjila prisutnost bilo kakvih nečistoća.



Slika 4. Uređaj za zavarivanje, [3]

Također, volfram elektrodu, bakrenu elektrodu te sapnicu na plameniku je potrebno očistiti od zaostale gareži i nečistoća.

Plamenik se nalazi na udaljenosti od 4 mm od cijevi dok se jakost struje postupno povećava od minimalne do odgovarajuće vrijednosti. Zavarena cijev na kraju se pomoću uređaja za automatsko namatanje cijevi namata na kolutove koji se otpremaju na daljnu proizvodnju rashladnih uređaja, [3].

3.1.3. Plazma zavarivanje, [4]

Plazma zavarivanje je jedna od relativno novih metoda zavarivanja koja se počela prvi put primjenjivati 1955. godine.

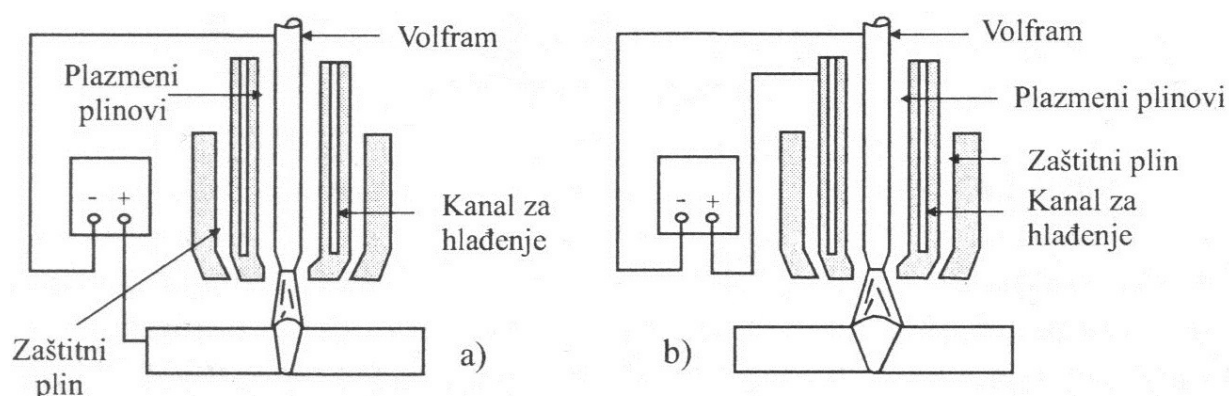
Porastom tlaka plina koji prolazi električnim lukom stvaraju se uvjeti za nastanak plazme (stanje ioniziranih plinova). Mlaz plazme je mlaz vrućih plinova koji na površini predmeta proizvodi koncentriranu gustoću snage do 500 W/mm^2 . U plinu koji prolazi električnim lukom dolazi do disocijacije i ionizacije zbog energije električnog luka.

Temperatura u električnom luku vrlo je visoka jer je električni luk oblikom sapnice koncentriran u vrlo usko područje. Plin pretvoren u plazmu nakon izlaska iz sapnice (koju napušta velikom brzinom), vraća se u stablino stanje, prenoseći energiju preuzetu iz električnog luka na osnovni materijal.

Za stvaranje plazme, slika 5, električni se luk uspostavlja između W-elektrode (spojena na “-“ pol izvora struje) i osnovnog materijala (preneseni luk) i između W-elektrode i hlađenih usta sapnice pištolja (nepreneseni luk). Postupak plazma zavarivanja prenesenim lukom sličan je zavarivanju netaljivom elektrodom, ali je električni luk znatno uži, bolji je prijenos topline, veća penetracija i brzina zavarivanja. Plazma zavarivanjem neprenesenim lukom toplina se na zavareni dio prenosi samo plazmom, a velika je prednost što zavareni komad nije uključen u strujni krug i ne mora biti električni vodič.

Uređaj za plazma zavarivanje čine izvor struje, boce plazmenog i zaštitnog plina i plazma pištolj. Izvor struje uglavnom je istosmjerni sa strmom padajućom statičkom karakteristikom i vrlo visokim naponom (100-400 V) potrebnim za namještanje električnog luka na povišenom tlaku.

Plazma pištolj sličan je pištolju za TIG zavarivanje, ali je W-elektroda uvučena u sapnicu te ima kanal za plazmeni plin i obavezan sustav hlađenja vodom. Tijekom vodenog hlađenja stupa električnog luka u otvoru dolazi do suženja luka, pojačava se gustoća snage mlaza plazme i temperatura poraste na 10000-20000 K. U usporedbi s otvorenim električnim lukom kod TIG postupka zavarivanja mlaz plazme daje bolji prijenos topline, veću brzinu zavarivanja i dublju penetraciju. Koncentrirani mlaz vrućih plazmenih plinova tali osnovni materijal i oblikuje talinu zavarenog spoja.



Slika 5. Shematski prikaz plazme s prenesenim (a) i neprenesenim (b) lukom na osnovni materijal, [4]

Ovaj postupak zavarivanja provodi se bez dodatnog materijala (protaljivanje spajanih rubova) ili uz dodatni materijal (žica). Za plazma zavarivanje koriste se plazma i zaštitni plinovi. Plazmeni plinovi su obično argon, vodik, dušik, helij ili njihove mješavine. U novije vrijeme sve se više koriste plazma uređaji koji kao plazmeni plin koriste zrak (što je najjeftinije), ali je elektroda u tom slučaju od cirkonija i drugačijeg je oblika. Kao zaštitni plin koriste se argon (najčešće), helij ili njihove mješavine, ponekad uz dodatak male količine nekih aktivnih plinova.

Kod plazma postupaka zavarivanja koriste se tehnika taljenja i protaljivanja. Kod tehnike protaljivanja plazmeni mlaz protaljuje čitavu debljinu osnovnog materijala stvarajući u materijalu otvor oblika ključanice, a zavareni spoj nastaje tako što rastaljeni materijal zbog površinske napetosti zatvara taj otvor. Ovom tehnikom mogu se u jednom prolazu zavarivati Al-legure debljine do 12 mm, nije potrebno ukošavanje rubova (dobar i ekonomičan I-zavar), može se raditi ručno ili mehanizirano u svim položajima zavarivanja.

Iako se ovaj postupak ne koristi za zavarivanje svih materijala, treba naglasiti da je pogodan praktički za sve tehničke materijale. Plazma postupkom najčešće se zavaruju visokolegirani čelici i Ti-legure. Budući da su prisutne visoke gustoće snage, materijal se u blizini zavarenog spoja slabo zagrijava pa su i deformacije minimalne. Zavareni spoj priprema se kao sučeljeni. Pri zavarivanju Ti-legura od oksidacije je nužno štititi zagrijano područje iza i ispod zavora (upuhivanjem mješavine argona i He).

Zavarivanje plazmom koristi se za materijale prosječne debljine veće od 2,5 mm. Korištenjem tzv. mikroplazma postupka mogu se zavarivati tanke folije i limovi (0,05-2,5 mm). Mikroplazma se često koristi za zavarivanje u proizvodnji medicinske i optičke opreme te za izradu nakita. Zavarivanje plazmom se uglavnom koristi za zavarivanje tanjih materijala i mehanizirano zavarivanje. Vrlo tanki limovi i folije mogu se zavarivati i ručno. Za zavarivanje tanjih limova električni luk se zatvara preko sapnice, a prema van struji samo užarena plazma. To je posebno pogodno za ručno zavarivanje jer se udaljavanjem od zavarivanog predmeta ne prekida električni luk.

W-elektroda se u pravilu spaja na “- “ pol istosmjerne struje koji je hladniji od “+ “ pola. Pri strujama višim od 100 A i spoju elektrode na “- “ polu brzo bi došlo do oštećenja elektrode. Za zavarivanje aluminijske i magnezijске elektrode se priključuje na “+ “ pol, ali se u tom slučaju elektroda brže oštećuje (troši).

Dobre strane zavarivanja plazmom su: razmak između pištolja i osnovnog materijala nije kritična veličina, električni luk je stabilan, velika brzina zavarivanja, duboko i potpuno protaljivanje u jednom prolazu i uska zona utjecaja topline.

Loše strane zavarivanja plazmom su: velika osjetljivost plazma pištolja u usporedbi s TIG pištoljem, pištolj se mora hladiti vodom (pripremljena voda bez kamenca) i nužno je vrlo točno održavanje razmaka između vrha elektrode i sapnice, [4].

3.1.4. Kontrola tijekom postupka zavarivanja cijevi

Tijekom zavarivanja trake redovito se kontroliraju mjesta nastanka nezavarenog spoja (rupe), kao i oblik zavarene cijevi zbog mogućeg nastanka ispupčenja na mjestu zavarivanja. Također, tijekom procesa pomičnim mjerilom se kontrolira promjer zavarene cijevi. Nakon zavarivanja reže se uzorak cijevi sa zavarenog koluta, razreže ga se na način da se vidi zavar sa unutarnje strane cijevi te se pregledava na mikroskopu.

Kako bi zavarena cijev bila prihvatljiva ne smije biti ispupčenja na mjestu zavora, promjer cijevi treba biti u dopuštenim tolerancijama, [3].

3.2. Kalibriranje cijevi

Nakon što je cijev formirana iz polazne čelične trake provlačenjem kroz matrice promjer dobivene cijevi se smanjuje na potrebni iznos.

3.2.1. Kalibriranje

Prije samog kalibriranja slobodni kraj cijevi potrebno je zagrijati do usijanja te ga kliještima formirati radi lakšeg uvlačenja u matricu.

Ovisno o traženoj promjeni promjera cijev može prolaziti istovremeno kroz dvije različite matrice postavljene jedna iza druge. Prije ulaska cijevi u pojedinu matricu, u cilju smanjenja trenja, cijev se obilno polijeva uljem, kao što se može vidjeti na slici 6 (1 – polijevanje uljem, 2 – kućište matrice, 3- matrica, 4 – cijev). Nakon prolaska kroz matrice cijev prolazi kroz posudu sa sredstvom za odmašćivanje te dalje do uređaja za namatanje cijevi.

Matrica je izrađena od dva dijela: čeličnog kućišta u kojega je uprešan alat za provlačenje. Alat za provlačenje je izrađen metalurgijom praha od WC, TiC, TaC i Co prahova. Dobiveni prah se oblikuje na željeni oblik kako bi se maksimalno smanjila naknadna strojna obrada dobivenog alata nakon čega slijedi sinteriranje u vakuumu te vruće izostatičko prešanje (HIP) pri tlaku od 1 000 bara i temperaturi od približno 1 400°C. Tako dobiveni alat se zatim uprešava u čelično kućište s čime se dobiva matrica za provlačenje.

Samo kalibriranje se odvija pri brzini od 6-8 m/min ovisno o promjeru i promjeni promjera cijevi. Korištene matrice su izrađene od tvrdog metala proizvođača Ceratizit prilikom čega neobrađene matrice postižu trajnost od otprilike 200 000 m provučene cijevi dok kod matrice s tankom tvrdom prevlakom imaju i do dva puta veću trajnost. Dozvoljena dopuštena odstupanja iznose 0,08 mm nakon čega sva veća odstupanja u promjeru cijevi nisu dopuštena te je potrebno matricu zamijeniti s novom.

Nadalje, usporedbe radi, matrica s dijamantnom prevlakom može izdržati i preko 5 000 000 m provučene cijevi prije nego se postignu dopuštena odstupanja.

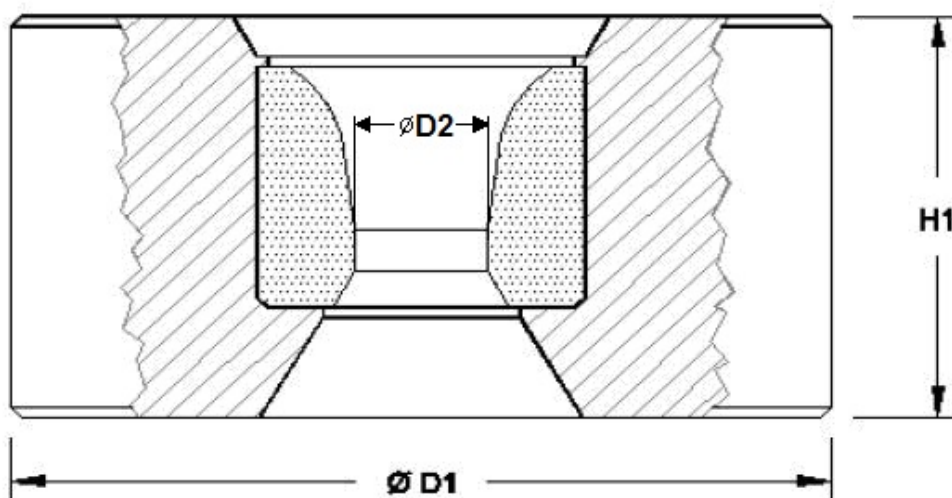
Za svakih jedan milimetar smanjenja promjera cijevi dobiva se do 12% na dužini cijevi.



Slika 6. Ulaz cijevi u matricu, [3]

1 – polijevanje uljem, 2 – kućište matrice, 3- matrica, 4 – cijev

Poprečni presjek matrice se može vidjeti na slici 7 koji se ne mijenja s obzirom na promjer cijevi, [3]



Slika 7. Poprečni presjek matrice, [3]

H_1 – visina matrice, D_1 – promjer matrice, D_2 - radni promjer matrice

3.2.2. Kontrola tijekom postupka kalibriranja cijevi

Tijekom odmatanja zavarene cijevi uz pomoć senzora na uređaju za kalibriranje detektiraju se mjesta s nezavarenim mjestima te se ista odstranjuju. Mikrometrom se provodi kontrola promjera kalibrirane cijevi kao i njezin oblik zbog mogućih deformacija. Nakon kalibriranja svaki namotan kolut se ispituje na nepropusnost komprimiranim zrakom u trajanju od minimalno 30 minuta na uređaju prema slici 8.



Slika 8. Uređaj za ispitivanje nepropusnosti, [3]

Kriteriji prihvatljivosti cijevi nakon kalibriranja su sljedeći:

- promjer kalibrirane cijevi mora biti unutar propisanih tolerancija,
- cijev ne smije imati ispupčenje na mjestu zavarivanja, kao ni ostalih mehaničkih oštećenja i
- cijev nakon ispitivanja pod tlakom ne smije propuštati, [3]

3.3. Žarenje cijevi

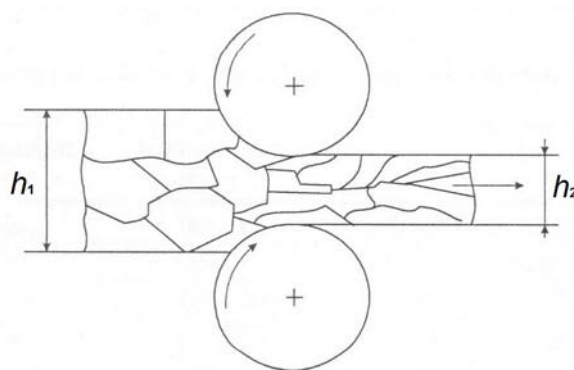
Kako bi se uklonila zaostala naprezanja nakon kalibriranja cijevi potrebno je provesti postupak žarenja u cilju povećanja daljnje obradivosti cijevi.

3.3.1. Rekristalizacijsko žarenje

Radi se o postupku toplinske obrade kojim se stvaranjem klica kristalizacije i rastom zrna (bez transformacije faza) izaziva stvaranje novog zrna u prethodno hladno oblikovanom metalu s ciljem omekšanja i povišenja duktilnosti.

Hladno se oblikovanje metalnih limova (duboko vučenje, provlačenje, valjanje i sl.) karakterizira stupnjem deformiranja, slika 9. Posljedice su hladnog deformiranja umnožene dislokacije.

Povišenjem stupnja deformiranja povisuje se gustoća dislokacija, a time i prirast granice razvlačenja (hladno očvrnuće) i stupanj usmjerenosti (tekstura deformiranja). Usmjerenost kristalita ima za posljedicu sve jaču pojavu anizotropije svojstava.



Slika 9. Shematski prikaz hladnog valjanja lima te pojave teksture valjanja, [5]

h_1 – početna debljina lima, h_2 – dobivena debljina lima

Metal je hladnim oblikovanjem deformacijom doveden u stanje povišene razine slobodne energije pa će prema osnovnim energetske zakonima težiti sniženju te razine. U toj težnji osnovnu ulogu igra difuzija koja će prvenstveno ovisiti o temperaturi ugrijavanja hladno deformiranog metalnog proizvoda.

Proces rekristalizacijskog žarenja se provodi pri temperaturi od otprilike $0,4T_c$, iz čega se da zaključiti kako će za neke niže taljive metale doći do rekristalizacije već pri sobnoj temperaturi.

Pri navedenoj temperaturi počinje za vrlo jako deformirano stanje tipični kristalizacijski proces: rekristalizacija, tj. stvaranje novih velikokutnih zrna počevši od klica unutar deformiranih kristalita. Za niže stupnjeve deformiranja rekristalizacija će početi tek pri višim temperaturama.

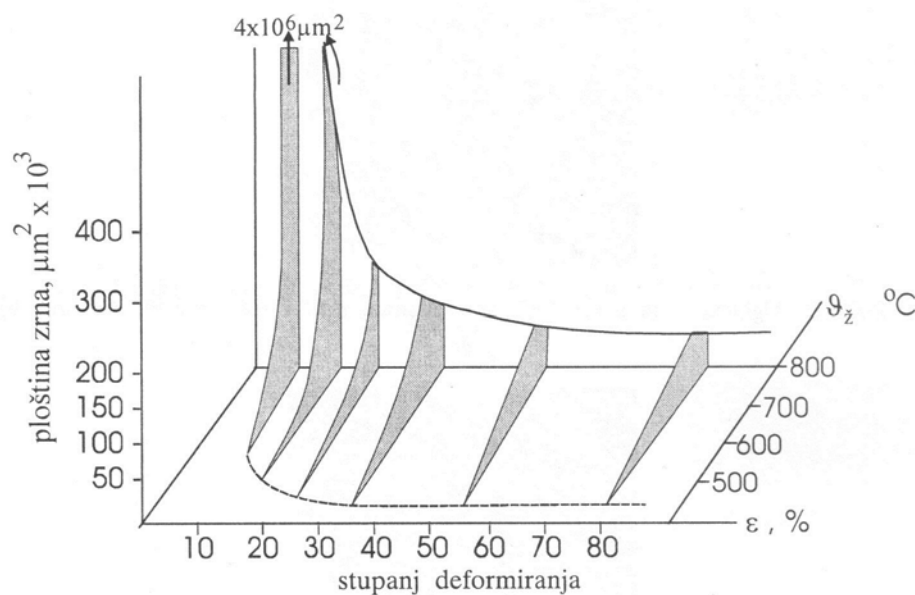
Nakon završene potpune rekristalizacije u području sitnog kristalnog zrna praktički se sva mehanička i fizikalna svojstva vraćaju na vrijednosti prije hladnog oblikovanja. Ako bi se u cilju rekristalizacije primijenile previsoke temperature ili preduga trajanja došlo bi do postrekristalizacijskih promjena: rast rekristaliziranog zrna pa čak i sekundarne rekristalizacije.

Rast zrna je u stvari migriranje (seljenje) rekristaliziranog (poligonalnog) zrna u smislu “konzumiranja” susjednih zrna ili subzrna.

Pod “sekundarnom rekristalizacijom” podrazumijeva se uočeni diskontinuirani rast zrna pri razmjerno visokim temperaturama bližim točkama solidusa. Fizikalni uzrok ovoj pojavi nije još potpuno rastumačen.

Rekristalizacijsko žarenje provodi se redovno u cilju omogućenja daljnjeg hladnog oblikovanja deformiranjem onih proizvoda, koji su tijekom prethodnog oblikovanja suviše očvrsnuli. Ono se češće provodi na neželjeznim legurama, a rjeđe pri proizvodnji čeličnih limova, cijevi, žice, šipki itd. hladnim valjanjem odnosno provlačenjem.

Vrlo dobru orijentaciju za definiranje traženih parametara daju prostorni rekristalizacijski dijagrami, slika 10.



Slika 10. Rekristalizacijski dijagram elektrolitički pročišćenog željeza, [5]

Brzine ugrijavanja nisu od primarne važnosti, no ipak se preporuča nešto brže ugrijavanje, kako ne bi mjestimično počeo proces rekristalizacije već pri nižim temperaturama jer su neki lokaliteti vjerojatno i jače deformirani.

Brzine ohlađivanja ne smiju biti previsoke kako radi napetosti tako i zbog opasnosti da kod precipitacijski očvrnutih legura ne bi došlo do pojave homogenizacijskog gašenja, a pri novom ugrijavanju i do precipitacije čestica, [5].

3.3.2. Proces žarenja

Prvo se kolut s namotanom cijevi propuhuje s dušikom pod tlakom od 4 bara u trajanju od 10-15 minuta nakon čega se stavlja plastični čep na unutarnji slobodni kraj cijevi. U početak cijevi se umetne spojna cjevčica manjeg promjera te se sve zajedno umetne u cijev koja je već provučena kroz peć. Sam proces žarenja se provodi na temperaturi od 1080°C dok cijev prolazi kroz peć za žarenje brzinom od 0,9 m/min. Uređaj za žarenje može se vidjeti na slici 11.

Nakon što cijev cijelom svojom dužinom prođe kroz proces žarenja ponovno se namata na kolut. Poslije provedenog postupka žarenja ponovno se provodi ispitivanje nepropusnosti kao kod procesa kalibriranja, [3].



Slika 11. Uređaj za žarenje, [3]

3.3.3. Kontrola nakon žarenja i prije pakiranja

Mikrometrom se provodi kontrola promjera gotove cijevi kao i njen oblik zbog mogućih deformacija. Nakon žarenja svaki kolut namotane cijevi potrebno je ispitati na nepropusnost komprimiranim zrakom u trajanju od minimalno 30 minuta.

Kriteriji prihvatljivosti cijevi su identični kao i prilikom kontrole nakon kalibriranja cijevi, [3].

4. TRENJE I TROŠENJE

Prilikom prolaska cijevi kroz matricu za kalibriranje zbog velikog trenja između kliznih površina dolazi do zagrijavanja matrice te samim tim i do njenog povećanog trošenja. U svrhu smanjenja nastalog trenja između kliznih površina primjenjuje se obilno zalijevanje cijevi uljem što za posljedicu ima smanjeno zagrijavanje matrice te njeno sporije trošenje.

4.1. Trenje

Trenje se očituje kao mehanički otpor (sila) koji ometa ili sprječava relativno kretanje tijela u međusobnom dodiru. Sila trenja, dakle, djeluje na tijelo suprotno od relativne brzine kretanja. Trenje se također javlja i pri relativnom kretanju čestica unutar krutih materijala, tekućina i plinova. Za svladavanje trenja troši se energija koja se pretvara u toplinu. Ova toplina se prenosi na dijelove u dodiru i zagrijava ih.

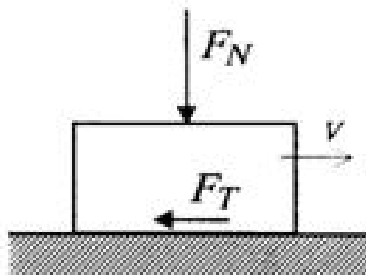
Posljedice trenja su:

- zagrijavanje na mjestu dodira,
- gubitak mehaničke energije koja se pretvara u toplinu,
- dodatna toplinska naprezanja u dijelovima koji su u dodiru i
- trošenje dodirnih površina,

ali i:

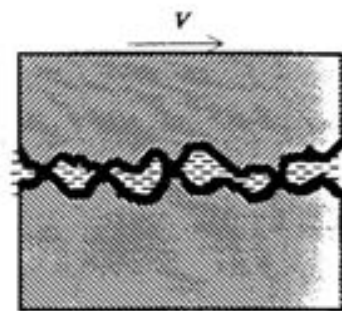
- povećani šum (buka) tijekom rada i
- trošenje dodirnih površina, [6].

U slučaju provlačenja cijevi kroz matricu za kalibriranje javlja se trenje klizanja – trenje između površina koje klize jedna po drugoj, tj. čije se brzine gibanja razlikuju po veličini i/ili smjeru, slika 12.



Slika 12. Trenje klizanja, [6]

Nadalje, budući da je cijev prije ulaska u matricu obilato podlivena uljem dolazi do pojave graničnog stanja trenja – ovakvo se stanje trenja postiže kad površine u dodiru nisu apsolutno čiste i suhe. Osim slojeva oksida i nečistoća na površinama se nalazi još i sloj molekula maziva. Opterećenje se također prenosi neposredno na dodirnim točkama (površinama) neravnina hrapavosti, ali su adhezija i hladno zavarivanje manji zbog postojećih oksidnih i ostalih slojeva na površini metala, slika 13, [6].



Slika 13. Mješovito trenje, [6]

4.2. Trošenje

Trošenje je postupni gubitak materijala s površine krutog tijela uslijed dinamičkog dodira s drugim krutim tijelom, fluidom i/ili česticama. Premda postoje neizbrojno veliki broj slučajeva trošenja, većina je autora suglasna da su samo četiri osnovna mehanizma trošenja:

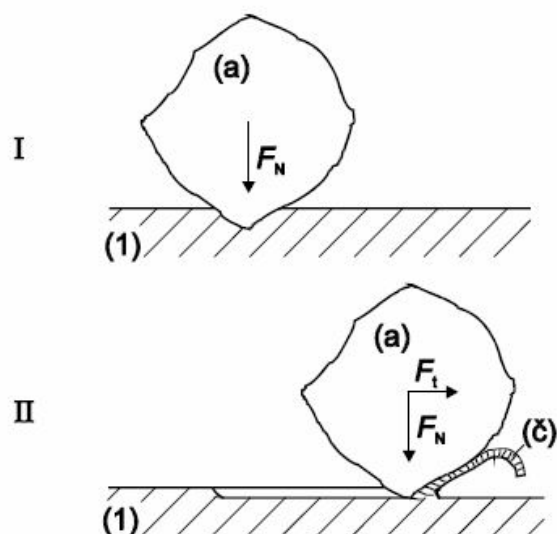
- abrazija,
- adhezija,
- umor površine i
- tribokorozija.

Mehanizmi trošenja opisuju se jediničnim događajima. Jedinični događaj je slijed zbivanja koji dovodi do odvajanja jedne čestice trošenja s trošene površine. On uvijek uključuje proces nastajanja pukotina i proces napredovanja pukotina, [7].

U slučaju kalibriranja cijevi dominantni oblik trošenja je abrazija uz prisutnu adheziju.

4.2.1. Abrazija

Abrazija je trošenje istiskivanjem materijala uzrokovano tvrdim česticama ili tvrdim izbočinama. Može se opisati kao mikrorezanje abrazivom nedefinirane geometrije oštrice s dvije faze jediničnog događaja, slika 14.



Slika 14. Jedinični događaj abrazije, [7]

Jedinični događaj abrazije sastoji se od dvije faze:

- I faza – prodiranje abraziva (a) u površinu materijala (1) pod utjecajem normalne komponente opterećenja F_N ,
- II faza – istiskivanje materijala u obliku čestica trošenja (č) pod utjecajem tangencijalne komponente opterećenja F_t .

Mehanizam abrazije moguće je analizirati s nekoliko različitih gledišta:

1. Ovisno o strukturi tribosustava u kome se zbiva abrazija mogu se pojaviti dva oblika abrazije:
 - a) abrazija u dodiru dva tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela i
 - b) abrazija u dodiru tri tijela – tribosustav se sastoji od dva funkcionalna dijela te međutijela koja se gibaju slobodno između funkcionalnih dijelova i djeluju abrazijski
2. Ovisno o međusobnom djelovanju između abrazijskih čestica i trošene površine:
 - a) mikrobrazdanje – odnošenje materijala je proporcionalno volumenu brazde nastale plastičnom deformacijom pri prolazu jedne abrazijske čestice, uz uvjet da se rubovi brazde odvoje od površine u obliku produkata trošenja,
 - b) mikrorezanje – odnošenje materijala jednako volumenu zareza nastalog prolaskom abrazivne čestice,
 - c) mikronaprnuća – odnošenje materijala s krhke površine mehanizmom nastanka i širenja mikropukotina i

d) mikroumor – odnošenje materijala mehanizmom umora površine nastalim učestalim izmjeničnim opterećenjem.

3. Ovisno o međusobnom odnosu tvrdoća abraziva i materijala:

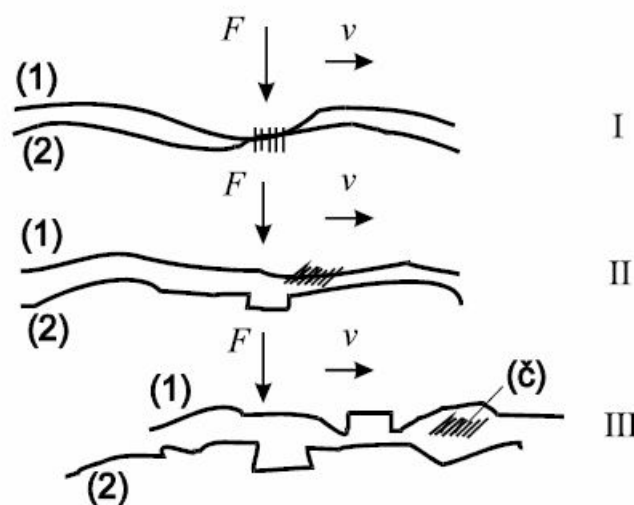
- a) čista abrazija – tvrdoća abraziva je veća od tvrdoće trošene podloge,
- b) selektivna abrazija – u abradiranom materijalu postoji faza tvrđa od abraziva i
- c) nulta abrazija – nastaje kada je cijela abradirana površina tvrđa od abraziva.

Otpornost na I fazu mehanizma abrazije određena je s više utjecajnih čimbenika, a najznačajniji je međusobni omjer mikrotvrdoće abraziva i materijala trošene površine. Na otpornost na II fazu mehanizma abrazije najutjecajniji čimbenik je način napredovanja pukotine koji općenito može biti duktilni, krhki ili umor površine, [7]

4.2.2. Adhezijsko trošenje

Adhezijsko trošenje karakterizira prijelaz materijala s jedne klizne plohe na drugu pri relativnom gibanju, a zbog procesa zarezivanja krutih faza. Jedinični događaj adhezije može se opisati u tri faze, slika 15:

- I faza – nastajanje adhezijskog spoja različitog stupnja jakosti na mjestu dodira izbočina,
- II faza – raskidanje adhezijskog spoja, čestica trošenja ostaje spontano nalijepljena na jednom članu kliznog para i
- III faza – otkidanje čestice, oblik čestice trošenja ovisi o uvjetima, a uglavnom je lističast.



Slika 15. Jedinični događaj adhezije, [7]

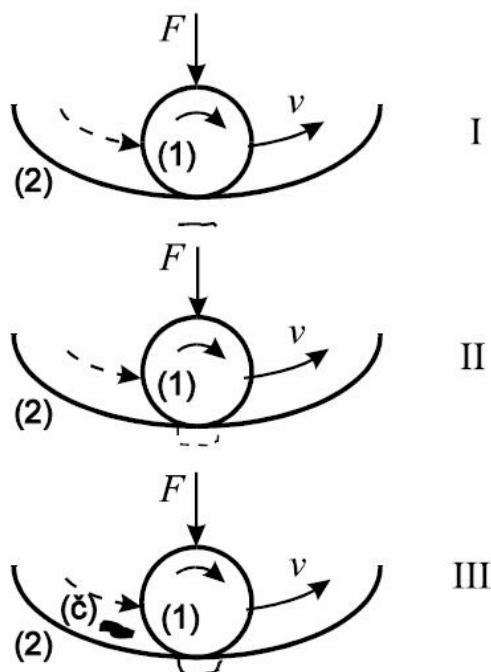
Čestice isčupane s jedne površine ostaju privremeno ili trajno naliječljene odnosno navarene na drugu kliznu površinu.

Otpornost na adhezijsko trošenje ovisi o sklonosti stvaranju mikrozavarenih spojeva kliznog para i jakosti uspostavljenih adhezijskih veza. Osnovni kriterij za ocjenu otpornosti na adhezijsko trošenje materijala tribopara je njihova tribološka kompatibilnost, [7].

4.2.3. Umor površine

Umor površine je odvajanje čestica s površine uslijed cikličkih promjena naprežanja. Jedinični događaj umora površine prikazan je na slici 16 s tri faze:

- I faza – stvaranje mikropukotine, redovito ispod površine,
- II faza – napredovanje mikropukotine i
- III faza – ispadanje čestice trošenja, obično oblika pločice ili iverka.



Slika 16. Jedinični događaj umora površine, [7]

U prvoj fazi nastaje podpovršinska pukotina jer je najveće smično naprežanje kod koncentriranog dodira uvijek ispod same površine. Ovo je tzv. faza inkubacije jer praktički nema nikakvog odvajanja čestica.

U drugoj fazi podpovršinska pukotina izbija na površinu. Od tog trenutka iz pukotine redovito izlaze sitne kuglaste čestice.

U trećoj fazi jediničnog događaja umora površine dolazi do ispadanja krupne čestice oblika ivera, što na površini ostavlja oštećenje oblika rupice. Zato se ovaj oblik trošenja uobičajeno naziva pitting (rupičenje).

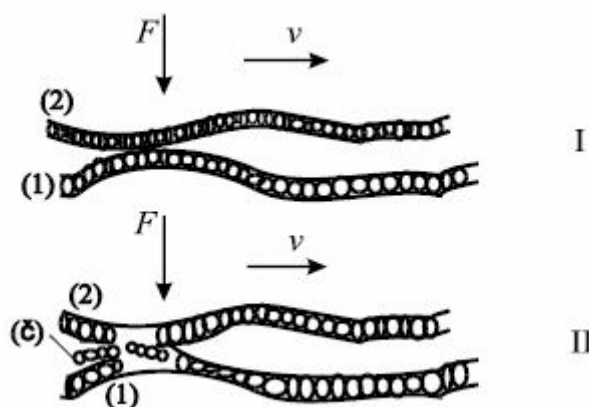
Otpornost na umor površine naziva se i dinamička izdržljivost površine. Ovisi o otporu gibanja dislokacija, a na njega utječe veliki broj čimbenika:

- podpovršinski koncentratori naprezanja,
- površinska obilježja,
- površinske pogreške,
- diskontinuiteti u geometriji dodira,
- raspodjela opterećenja u ležaju,
- elastohidrodinamika i
- tangencijalne sile, [7].

4.2.4. Tribokorozija

Tribokorozija ili tribokemijsko trošenje je mehanizam trošenja pri kojem prevladavaju kemijske ili elektrokemijske reakcije materijala s okolišem. Jedinični događaj tribokorozije s dvije faze prikazan je na slici 17:

- I faza – stvaranje (ili obnavljanje) sloja produkata korozije i
- II faza – mjestimično razaranje sloja produkata korozije.



Slika 17. Jedinični događaj tribokorozije, [7]

Najvažniji čimbenik otpornosti na tribokoroziju je kemijska pasivnost materijala u određenom mediju. Tribokorozija je u pravilu „poželjan“ mehanizam trošenja jer slojevi proizvoda korozije zaštićuju metalne površine od neposrednog dodira metal/metal, [7].

5. INŽENJERSTVO POVRŠINA

5.1. Karakteristike

Inženjerstvo površina je znanstvena disciplina koja se bavi istraživanjem i razvojem novih materijala za tribosustave u kojima djeluju različiti mehanizmi trošenja i u kojima se pojavljuju neke vrste korozije komponenata tribosustava, a često se radi i o njihovim kombinacijama. U suštini, riječ je o naknadnoj obradbi površine (koje su po potrebi prethodno na odgovarajući način pripremljene), pri čemu se dobiva površinski oplemenjeni sloj koji u sebi udružuje dobra svojstva podloge i površinskog sloja.

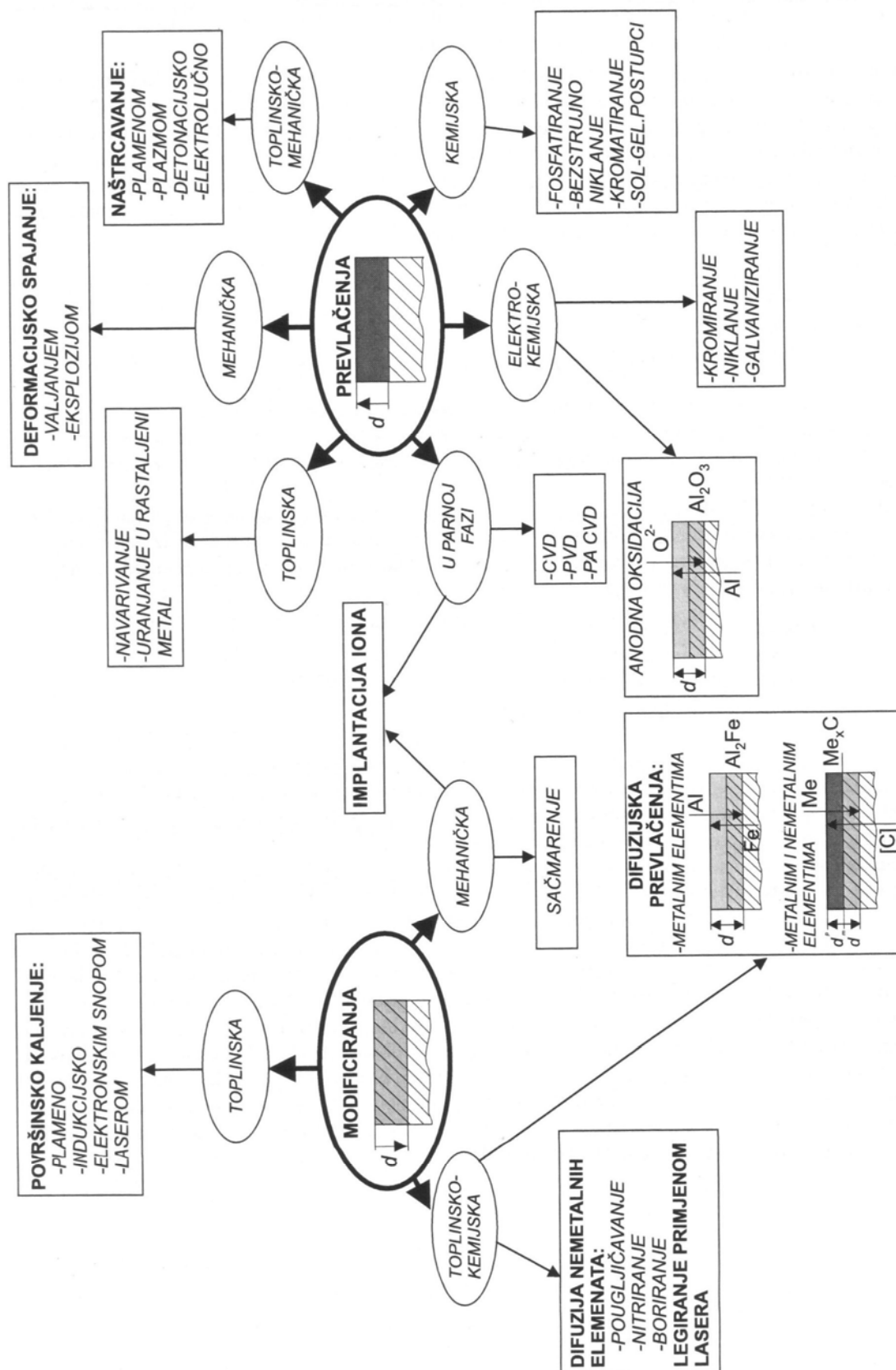
Osnovna značajka površinske obradbe je da se na odgovarajući način prethodno pripremljeni materijal (obradak) naknadno površinski tretira jednim ili više površinskih tehnologija ili postupaka. Na taj način se dobiva takva kombinacija svojstava površine materijala koja se ne može postići uoprabom bilo kojega jednorodnog materijala.

Općenito, površinska se obradba može provesti na tri različita načina:

- pripremom površine obrađivanog materijala promjenom njegovog sastava ili mikrostrukture,
- modifikacijom površine i
- prekrivanjem površine s različitim materijalima uključujući nastanak međupovršine.

Kao što se može vidjeti na slici 18, postoje brojni postupci i podjele površinske obradbe. Optimalan izbor odgovarajućeg postupka ovisi, u prvom redu, o uvjetima uporabe nekog proizvoda, tj. kakva se traži otpornost na trošenje, koroziju, biološka kompatibilnost, dekorativni izgled itd. Jedna od podjela površinske obradbe je na postupke modificiranja i na postupke prevlačenja. Kod postupka modificiranja površinski sloj nastaje od polazne površine prema unutrašnjosti obrađivanog materijala, dok se kod postupaka prevlačenja površinski sloj stvara na polaznoj površini.

Neki od osnovnih ciljeva površinske obradbe su: produžetak vijeka trajanja radnih sustava, povećanje zaštite od korozije i veća djelotvornost sustava, poboljšanje pouzdanosti, očuvanje oskudnih izvora materijala i energije, povećanje sigurnosti, zaštita okoliša putem smanjenja količine otpada, niži troškovi održavanja itd.



Slika 18. Shematski prikaz podjele postupaka površinske obradbe, [9]

Razvoj triboloških prevlaka usmjeren je i u primjeni hibridnih postupaka radi dobivanja dupleks ili višeslojnih prevlaka. Jedan od takvih hibridnih postupaka je i razvoj nitriranja i PVD postupaka, [8].

5.2. Podjela postupaka

Ovisno o načinu obradbe, vrsti prevlake odnosno obratka postupci prevlačenja odnosno površinske obradbe se mogu podijeliti na slijedeći način:

1. Postupci modificiranja površine mehaničkom obradbom:

Pjeskarenje – postupak mehaničke hladne obradbe kojom se u površinu obrađivanog metalnog materijala induciraju lokalna tlačna naprezanja

2. Postupci modificiranja površinskim kaljenjem:

Samo u površinskom sloju obratka postiže se martenzitna mikrostruktura, dok središnji dio obratka zadržava polaznu mikrostrukturu.

- a) Plameno kaljenje – površinski sloj obratka ugrijava se izravnim djelovanjem plinskog plamena, nakon čega se provodi gašenje
- b) Indukcijsko kaljenje – potrebna toplina se dobiva bez kontakta, a vrijeme ugrijavanja je kratko, postoji mogućnost parcijalnog kaljenja relativno kompliciranih obradaka, oskidacija i raugljičenje su zanemarivi
- c) Površinsko kaljenje laserom – toplinska energija dobiva se apsorpcijom laserskog zračenja te interakcijom laserskog snopa i slobodnih elektrona materijala
- d) Površinsko kaljenje elektronskim snopom – ugrijavanje se provodi u vakuumskoj komori užarenom katodom koja emitira elektrone, velike brzine zagrijavanja, malo vrijeme austenitizacije

3. Postupci modificiranja površine snopom iona

Odvijanje postupka se temelji na nanošenju inoiziranih atoma ili molekula u površine čvrstih tvari, ali bez promjene unutrašnjosti materijala

4. Postupci toplinsko-kemijske obradbe:

- a) Pouglljičenje – najčešće korišteni postupak kemijsko-toplinske obradbe, a temelji se na obogaćivanju obrađivane površine ugljikom i dijeli se na:
 - pouglljičenje u čvrstom sredstvu,
 - pouglljičenje u plinu,

- pougljičenje u solnoj kupki,
 - vakuumsko pougljičenje,
 - plazma pougljičenje i
 - superpougljičenje.
- b) Nitriranje – temelji se na difuziji dušika u površinski sloj obrađivanog predmeta te se može podijeliti na:
- plinsko nitriranje,
 - nitriranje u solnoj kupki i
 - plazma nitriranje.
- c) Karbonitriranje – površina obrađivanog predmeta se istodobno obogaćuje ugljikom i dušikom i dijeli se na:
- karbonitriranje u solnim kupkama i
 - karbonitriranje u plinu.
- d) Nitrokarburiranje – obogaćivanje površinskih slojeva obrađivanih predmeta postiže se dušikom i ugljikom te se dijeli na:
- nitrokarburiranje u solnim kupkama i
 - plinsko nitrokarburiranje.
- e) Boriranje – temelji se na difuziji bora u površinu obrađivanog predmeta i stvaranju borida te se može podijeliti na:
- boriranje u plinovima,
 - boriranje u kapljevitim sredstvima,
 - boriranje u čvrstim sredstvima i
 - boriranje u pasti.
5. Nanošenje metalnih prevlaka uranjanjem:
- a) Fizikalni postupci:
- vruće uranjanje,
 - naštrcavanje i
 - navarivanje.
- b) Kemijski postupci:
- galvanizacija,

- ionska izmjena i
- redukcija u otopini.

6. Navarivanje i naštrcavanje:

- a) Navarivanje – izvodi se popunjavanjem istrošenih površina, ali i poboljšanja površina na pojedinom strojnom dijelu ili alatu
- b) Naštrcavanje – nanose se kapljice rastaljenog metala fizikalnim putem na slabo predgrijani obrađivani predmet i može se podijeliti na:
 - plameno naštrcavanje,
 - elektrolučno naštrcavanje i
 - naštrcavanje plazmom.

7. Postupak prevlačenja površine plastičnom deformacijom:

- a) Platiranje – provodi se pod vrlo visokim tlakom koji dovodi do tečenja metala prevlake, a eventualno i podloge te se može podijeliti na:
 - obično platiranje,
 - eksplozijsko platiranje i
 - platiranje prahom.

8. Nataljivanje te metalizacija lemljenjem i lijepljenjem:

- a) Nataljivanje – nanošenje metalnih prevlaka na obrađivani predmet pri temperaturi nižoj od njegove temperature tališta
- b) Lemljenje – metalizacija se postiže nanošenjem prevlaka koje čvrsto prijanjaju na obrađivani predmet pomoću međusloja od lema
- c) Lijepljenje – metalizacija lijepljenjem postiže se nanošenjem prevlake koja čvrsto prijanja na obrađivani predmet putem međusloja od ljepila

9. Metalizacija galvanizacijom:

Najrašireniji postupak površinske obradbe, uz primjenu električne struje, pri kojemu se obrađivani predmet spaja katodno, a s pozitivnim polom izvora struje sapja se anoda (topljiva ili netopljiva).

10. Metalizacija bez struje:

Može se definirati kao autokatalistički proces nanošenja metala bez vanjskog izvora električne struje.

- a) Ionska izmjena – elektronegativniji metal se reducira elektropozitivnijim metalom koji se otapa
- b) Metalizacija redukcijom – proces se odvija u smjesi otopine koja sadrži ione koji su namijenjeni za stvaranje prevlake i otopine nekog reducensa

11. Difuzijska metalizacija:

Ostvaruje se na način da se obrađivani predmeti istodobno zasićuju s dva elementa, tzv. dupleks postupci, npr. kromiranje i aluminiranje, kromiranje i siliciranje, nitrokromiranje itd.

- a) Difuzijsko kromiranje – postupak površinskog zasićavanja čeličnih proizvoda kromom u cilju povećanja otpornosti na plinsku koroziju, koroziju u kiselinama te za povećanje površinske tvrdoće
- b) Difuzijsko aluminiziranje – površinsko zasićavanje čeličnih proizvoda aluminijem u cilju povećanja otpornosti na plinsku koroziju ili oksidaciju pri povišenim temperaturama

12. Kemijski postupak nanošenja prevlaka u parnoj fazi – CVD postupak:

Nanošenje slojeva u parnoj fazi kemijskim putem, a uključuje interakciju između smjese plinova u aktiviranom okolišu i površine zagrijavanoga osnovnog materijala

13. Fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze – PVD postupak:

Nanošenje prevlaka iz parne faze prilikom čega se deponirani materijal iz čvrste faze prenosi u parnu fazu, od izvora kroz vakuum ili plazmu na osnovni materijal, gdje se naknadno parna faza kondenzira u obliku tankog filma

14. Postupci nanošenja nemetalnih anorganskih prevlaka:

- a) Emajliranje – osnovni materijal i naneseeni sloj emajla nalaze se u reaktivnom stanju, što je praćeno brojnim fizikalno-kemijskim procesima
- b) Bruniranje – kemijski postupak površinske obradbe željeznih materijala pri čemu na njihovoj površini nastaju željezni oksidi ili hidroksidni slojevi
- c) Anodizacija (eloksiranje) – postupak površinske obradbe aluminija i njegovih legura stvaranjem oksidnog filma elektrokemijskim putem

- d) Fosfatiranje – postupak površinske obradbe metalnih materijala pri kojemu se na površini, kao posljedica kemijskih reakcija metala s elektrolitom, nastaju prevlake od netopljivih kristaličnih fosfata
- e) Kromatiranje – postupak nanošenja kromovih prevlaka na metalne površine
- f) Patiniranje – postupak površinske obradbe kojim se nastoji dobiti nijansa boje koju metal poprima nakon dugog izlaganja na zraku

15. Postupci nanošenja organskih prevlaka:

- a) Bojanje i lakiranje – najčešće korištena zaštita metalnih materijala od atmosferske korozije
- b) Plastifikacija – postupak površinske obradbe metalnih i nemetalnih materijala kod koje se dobivaju prevlake znatne debljine
- c) Gumiranje – postupak površinske obradbe metalnih predmeta koji su prethodno pripremljeni radi zaštite unutrašnjosti posuda i crijevnih dijelova postrojenja
- d) Bitumenizacija – postupak nanošenja bituminoznih tvari (naftni bitumen i katran kamenog ugljena) na čelične i betonske konstrukcije radi zaštite podzemnih i podvodnih konstrukcija

16. SOL-GEL postupak površinske obradbe:

Dobivanje homogenih anorganskih metalnih oksida željene tvrdoće, kemijske otpornosti, optičke prozirnosti i toplinske otpornosti, [8].

5.3. Prevlačenje u parnoj fazi

Budući da su prevlake na matricama za izradu cijevi u svrhu produženja vremena trajanja izrađene postupkom prevlačenja u parnoj fazi u ovom će poglavlju navedeni postupak biti detaljnije opisan.

Nanošenje prevlaka u parnoj fazi se može podijeliti u dvije osnovne skupine:

1. kemijski postupak nanošenja prevlaka u parnoj fazi – CVD postupak i
2. fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze – PVD postupak.

5.3.1. CVD postupak

CVD je postupak nanošenja slojeva u parnoj fazi kemijskim putem, a uključuje interakciju između smjese plinova u aktiviranom okolišu i površine zagrijanoga osnovnog materijala. Princip CVD postupka temelji se na kemijskom raspadu nekih od korištenih plinskih konstituenata i kemijskim reakcijama jednog ili više plinovitih spojeva s dugim parnim ili plinovitim fazama za dobivanje gustoga, krutoga i stabilnog filma ili prevlake na zagrijanom supstratu. Ovaj postupak atomarne depozicije daje materijale vrlo visoke čistoće, čija se struktura može kontrolirati na atomarnoj ili nanometarskoj razini.

Prevlačenje CVD tvrdim metalnim prevlakama smanjuje trošenje na osnovi snižene adhezije i abrazije. Smanjena adhezija utječe nadalje na sniženje trenja i opasnosti od hladnog navarivanja, koji kod obrade čelika s neprevučnim alatima mogu predstavljati velik problem. Time se u odnosu prema neprevučnim alatima omogućuje viša trajnost ili uz jednaku trajnost viša opteretivost.

CVD prevlačenje posebno je prošireno na ona područja primjene gdje su već osnovni najkvalitetniji materijali dostigli svoja granična svojstva, to je naročito slučaj kod prevlačenja alata za odvajanje čestica od tvrdog metala i kod alata za oblikovanje od visokolegiranih alatnih čelika.

Principijelno je moguće prevlačenje svih čelika. Preniski udjeli ugljika u čeliku smanjuju brzinu rasta slojeva. Uz visoki udjel slobodnog ugljika, tj. ugljika koji nije vezan u karbidima, dolazi za vrijeme rasta sloja do difuzije ugljika u sloj pa u površinskoj zoni podloge dolazi do izvjesnog razugljičenja. To se može negativno odraziti na svojstva obratka.

Vrlo su prikladni svi visokolegirani alatni čelici – uz brzorezne čelike i čelici za hladni rad. Nadalje dobro se daju prevlačiti tvrdi metali i cermeti.

U prevlačenju legura na osnovi neželjeznih metala do sada ima malo iskustva. Aluminijske legure nisu prikladne zbog svojega preniskog tališta, a Ti legure radi nepostojanosti prema prekursorima koji sadrže halogene elemente.

Za tribološke svrhe u primjeni se danas pojavljuju pretežno karbidi i nitridi četvrte do šeste podskupine. Od najveće je važnosti pri tome titan-nitrid, titan-karbid, kao i ternarni spoj titan-karbonitrid. Nadalje su poznati spojevi od cirkonij-nitrida, hafnij-nitrida, vanadij-karbida i također volfram-karbida i nekih drugih spojeva iz te klase.

Daljni tip sloja je aluminij-oksidi koji se ne pojavljuje kao pojedinačni sloj, nego većinom zajedno s ostalim vrstama tvrdih spojeva i to u višeslojnim prevlakama.

CVD prevlačenje s titan-nitridom ili sličnim tvrdim spojevima poboljšava otpornost na adheziju i abraziju.

Negativna strana CVD postupka je da maksimalna temperatura primjene prevučenih površina iznosi 500°C jer iznad te temperature dolazi vrlo brzo do oksidacije sloja. Odavde također proizlazi da pri zavarivanju može doći do oštećenja sloja.

Relativno visoke temperature imaju i pozitivno djelovanje. Tako će pri ugrijavanju osnovnog materijala u struji vodika, tj. u reducirajućim uvjetima, biti vrlo učinkovito odstranjen kisik iz površine, koji se tamo nalazi u obliku vrlo tanke oksidne kože.

Nadalje, za vrijeme rasta sloja dolazi do pojačane međudifuzije između osnovnog materijala i sloja. To ukupno rezultira prionjivošću slojeva, [9].

CVD postupci se dijele na:

- toplinski CVD,
- plazma CVD – PACVD,
- laserski CVD – LCVD,
- foto CVD – PCVD,
- metalo-organski CVD – MOCVD,
- epitaksijalna depozicija kemijskim snopom – CBE,
- atomarna depozicija sloja – CBE,
- kemijska parna infiltracija – CVI i
- fluidizirani CVD, [8].

5.3.2. PVD postupak

PVD postupak je tzv. fizikalni postupak nanošenja prevlaka iz parne faze. To znači da se nanese materijal, dobiven na fizikalni način, iz čvrste faze prenosi (naparavanjem ili naprašivanjem) u parnu fazu, od izvora kroz vakuum ili plazmu na osnovni materijal, gdje se naknadno parna faza kondenzira u obliku tankog filma.

Debljina PVD prevlake je najčešće 2-5 µm za monoslojne, a do 15 µm za višeslojne prevlake. U nekim slučajevima debljina prevlake može dostići i 100 µm. Brzina nanošenja PVD prevlaka je 3-18 µm/h, [8].

Slično kao i CVD prevlake, i PVD prevlake tvrdih spojeva smanjuju trošenje na osnovi sniženja abrazije i adhezije. Nadalje, smanjuju faktor trenja pri adheziji. Time se u usporedbi s neprevučanim dijelovima postiže viša trajnost, odnosno uz jednaku trajnost može se postići npr. viša brzina rezanja.

Budući da se pri stvaranju sloja za vrijeme PVD procesa ne radi o kondenzaciji, moguće je u načelu prevlačiti sve materijale, pri nekoj optimalnoj temperaturi. Uz sve čelike mogu se prevlačiti tvrdi metali i cermeti, kao i neželjezne legure. Ako se temperatura osnovnog materijala drži dovoljno niskom, mogu se prevlačiti i polimeri i kod odgovarajućeg vođenja procesa i električki nevodljivi keramički materijali.

Kako PVD prevlačenje predstavlja uvijek posljednji korak u proizvodnji, treba kod prevlačenja čelika znati da se za vrijeme prevlačenja ne smije prekoračiti ranije odabrana temperatura popuštanja.

Površinska hrapavost dijelova prije prevlačenja treba biti toliko dobra koliko se traži za primjenu, jer PVD prevlačenjem dolazi do samo neznatnog daljnjeg ohrapavljenja površine.

Za tribološke svrhe primjenjivi su nitridi i karbonitridi četvrte do šeste sporedne skupine periodnog sustava. Danas su najvažniji titan-nitrid, krom-nitrid, tenarni spojevi titan-karbonitrid, a također titan-aluminij-nitrid. Uz to su poznati brojni daljnji sustavi slojeva, [9].

Na raspolaganju postoji slijedećih pet tehnički realiziranih metoda nanošenja prevlaka PVD postupkom:

- katodno otprašivanje
- isparavanje snopom elektrona,
- toplinsko isparavanje
- isparavanje laserskim zrakama i
- naštrcavanje, [10].

Putem PVD-a postignute prevlake slične su svojim svojstvima CVD prevlačenju. Tako će i ovdje TiN i TiAl poboljšati otpornost na abraziju i adheziju. Također se događa da se ostala svojstva vrlo malo mijenjaju, [9].

5.3.2.1. Katodno otprašivanje

Proces katodnog otprašivanja koristi električni luk za isparavanje materijala koji se nalazi na katodi. Materijal u parnoj fazi nakon toga kondenzira na substratu na taj način formirajući tanki film. Ova metoda se može koristiti za nanošenje metalnih, keramičkih i kompozitnih materijala.

Postupak isparavanja započinje sudaranjem električnog luka velike jakosti struje, malog napona na površinu katode (također nazivane i metom) s vrlo koncentriranim (obično širokim nekoliko mikrometara) područjem utjecaja s vrlo visokom gustoćom snage nazvanim katodnom točkom. Lokalizirana temperatura na katodnoj točki je vrlo visoka i iznosi oko 15000°C što rezultira velikom brzinom mlaza (10 km/s) isparenog materijala. Kretanje električnog luka upravljano je putem elektromagnetskog polja.

U slučaju da katodna točka ostane predugo na točki isparavanja može doći do izbacivanja velike količine makro-čestica ili kapljica. Ove kapljice su štetne za funkcioniranje same nanosene prevlake jer slabo prijanja za osnovni materijal te se može proširiti i na ostatak prevlake.

Nanošenje tankih tvrdih prevlaka metodom katodnog otprašivanja primjenjuje se za nanošenje ekstremno tvrdih prevlaka korištenih za zaštitu površine reznih alata te značajnog produženja njihovog životnog vijeka. Ovim postupkom se mogu nanositi vrlo tvrde te nanokompozitne prevlake kao što su TiN, TiAlN, CrN, ZrN, AlCrTiN i TiAlSiN, [10].

5.3.2.2. Isparavanje snopom elektrona

Isparavanje snopom elektrona je vrsta PVD postupka prilikom kojega se anodna meta bombardira snopom elektrona emitiranih s nabijene volframove niti pod visokim vakuumom. Zagrijan snopom elektrona materijal s mete prelazi u parnu fazu nakon čega se ispareni materijal vraća u čvrsto stanje prevlačeći tankim slojem sve što se nalazi u vakuumiranoj komori.

Obradak na koji će se nanositi tanka tvrda prevlaka ovom vrstom PVD postupka prethodno mora biti očišćen ultrazvukom te pričvršćen za držač koji ima mogućnost pomicanja kako bi se prevlaka nanijela ravnomjerno po cijeloj površini.

Brzina nanošenja sloja se može kretati od 1 nm do nekoliko mikrometara u minuti. Učinkovitost isparavanja snopom elektrona je veća u usporedbi s ostalim metodama te je moguća morfološka kontrola nanesenog sloja. Zbog vrlo visoke brzine nanošenja sloja ovaj postupak ima potencijal u industrijskoj primjeni za nanošenje slojeva otpornih na trošenje te toplinski izolirajućih slojeva u svemirskoj industriji.

Ovaj postupak se ne može koristiti za nanošenje tvrdih prevlaka na unutrašnje površine obradaka složene geometrije, [10].

5.3.2.3. *Toplinsko isparavanje*

Toplinsko isparavanje je uobičajena metoda nanošenja tankih tvrdih prevlaka gdje nanošeni materijal isparava u vakuumu. Ispareni materijal se nanosi direktno na obradak gdje kondenzira natrag u čvrsto stanje.

Proces se provodi pod visokim vakuumom kako bi se olakšao prijenos isparenog materijala, eliminirala mogućnost reakcije s neželjenim elementima kao što je kisik te bolja kontrola debljine nanesenog sloja.

Čistoća i kvaliteta nanesenog sloja ovisi o kvaliteti vakuuma i čistoći materijala koji se nanosi te brzini s kojom se materijal nanosi. Debljina nanesenog sloja varira ovisno o geometriji komore za isparavanje, sudari s zaostalim plinovima pogoršavaju nejednoličnost debljine nanesenog sloja, [10].

5.3.2.4. *Isparavanje laserskim zrakama*

Metoda isparavanja laserskim zrakama koristi lasersku zraku visoke snage koja je fokusirana na materijal koji se nanosi, a nalazi se unutar vakuumske komore.

Detaljni mehanizam isparavanja laserskim zrakama je vrlo složen te uključuje proces odnošenja ciljanog materijala laserskim zračenjem, razvoj plazma perjanica s visokim energetske ionima, elektronima i neutronima te rast kristala prevlake na zagrijanom obratku. Cjelokupni proces se može općenito podijeliti na četiri koraka:

- lasersko odnošenje ciljanog materijala i stvaranje plazme,
- dinamika plazme,
- nanošenje odnesenog materijala na obradak i
- nukleacija i rast filma na površini obratka.

Bitni čimbenici koji imaju utjecaj na brzinu nanošenja sloja su: ciljani materijal, energija lasera, udaljenost od mete do obratka te vrsta plina i tlaka u komori, [10].

5.3.2.5. Taloženje

Nanošenje naštrcavanjem je PVD postupak nanošenja tankih tvrdih prevlaka putem naštrcavanja koje uključuje izbacivanje ciljanog materijala koji se nanosi na obradak kao što je silikonska pločica. Naštrcani materijal izbačen s mete ima veliku raspodjelu energije. Cijeli raspon od visoko-energetskog balističkog udara pa do nisko-energetskog termičkog kretanja dostupno je mijenjanjem tlaka plina u komori. Najčešće se kao plin koristi argon iako se mogu koristiti i reaktivni plinovi.

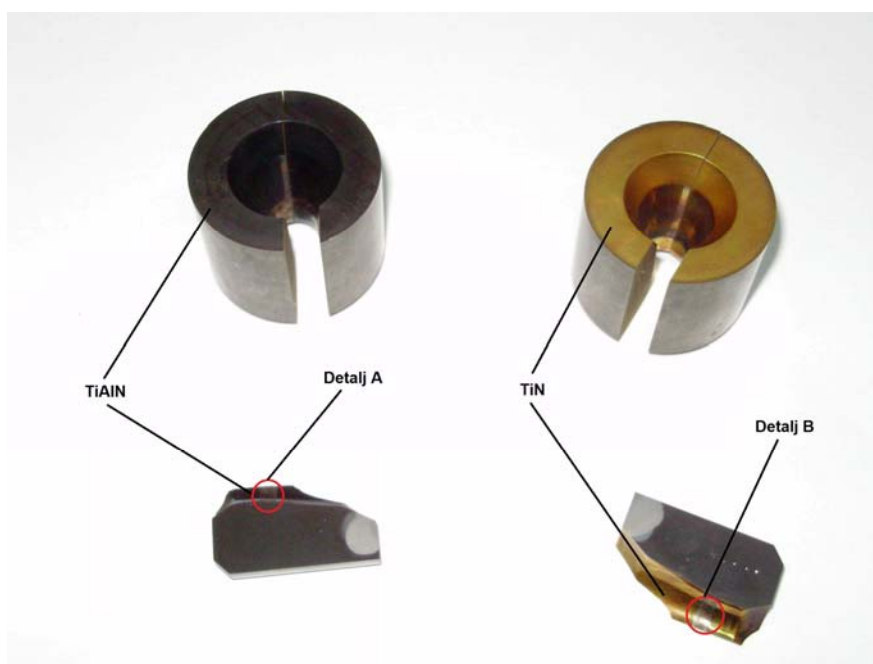
Naštrcavanje se najviše koristi u poluvodičkoj industriji za nanošenje tankih slojeva različitih materijala, antirefleksijskih prevlaka na stakla za optičke primjene te nanošenje metalnog sloja tijekom proizvodnje CD-a i DVD-a.

PVD postupak naštrcavanja ovisno o metodi s kojom se izvodi se može podijeliti na:

- naštrcavanje snopom iona,
- reaktivno naštrcavanje,
- nanošenje potpomognuto ionima,
- upotreba ciljanog naštrcavanja,
- naštrcavanje visokoenergetskim magnetskim impulsima i
- naštrcavanje strujom plinova, [10].

6. EKSPERIMENTALNI DIO

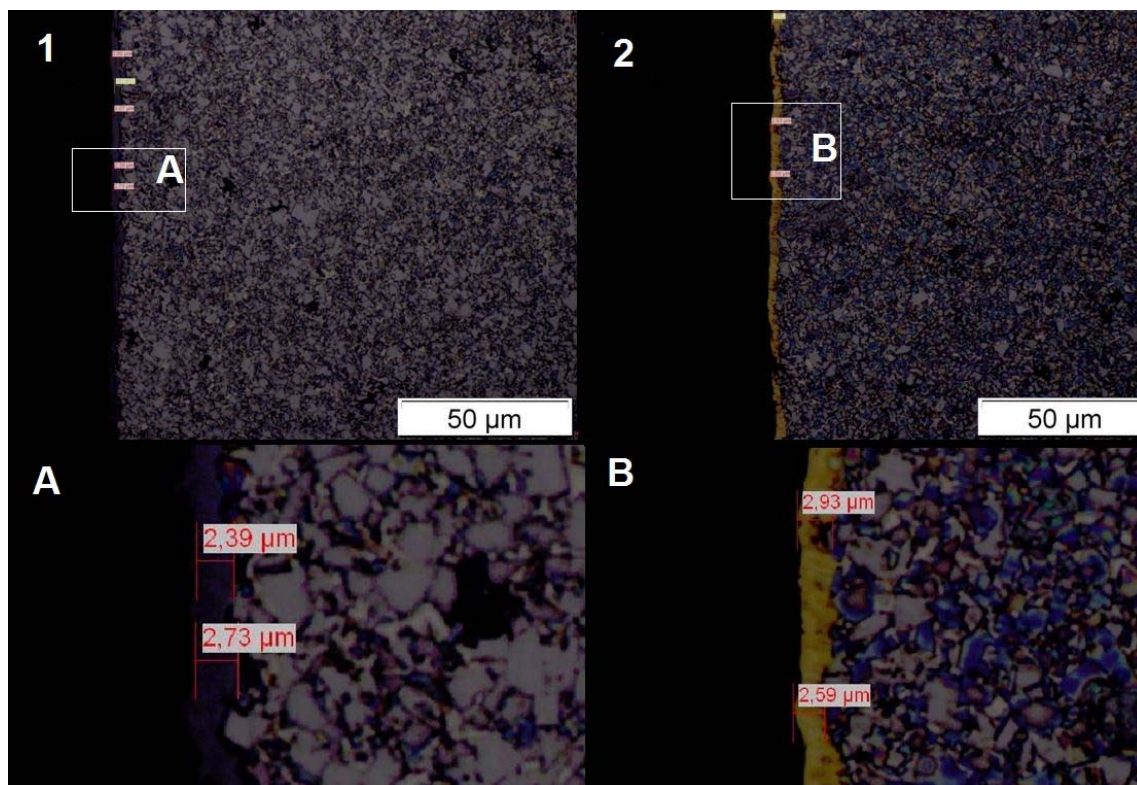
U ovom dijelu rada bit će provedeno ispitivanje mikrotvrdoće po Vickersu te promatranje dobivenih uzoraka putem skenirajućeg elektronskog mikroskopa. Kako bi se provela potrebna ispitivanja prvo je bilo potrebno izrezati uzorke. Izrezani uzorci su prikazani na slici 19 gdje je naznačeno na koju matricu je nanešena koja vrsta tanke tvrde prevlake dok se mjesto trošenja nalazi na mjestima označenim s detalj A i B.



Slika 19. Izrezani uzorci

Kao što je prethodno bilo navedeno u poglavlju 3.2.1 matrice su izrađene od tvrdog metala te proizvedene u tvrtki Ceratizit. U eksploataciji su korištene matrice različitog unutarnjeg promjera od istog proizvođača gdje su na dvije matrice naknadno nanesene tanke tvrde prevlake kako bi se povećala trajnost. Matrice bez nanesene tanke tvrde prevlake postizale su trajnost od približno 200 000 m provučene cijevi dok su matrice s TiAlN i TiN prevlakama postizale približno istu trajnost od 400 000 m provučene cijevi, tj. dvostruko veću trajnost.

Prije bilo kakvog daljnjeg mjerenja i ispitivanja izvršen je pregled uzoraka pod svjetlosnim mikroskopom Olympus GX51 te se na slici 20 može vidjeti mikrostruktura tvrdog metala grupe K (sastoji se od WC karbida) kao i debljina nanesenog sloja tanke tvrde prevlake pri povećanju od 1 000:1. Također se može primjetiti kako naneseeni sloj tanke tvrde prevlake iznosi u prosjeku 3 μm .



Slika 20. Mikrostruktura tvrdog metala i debljina prevlake pod svjetlosnim mikroskopom

1 i A – TiAlN sloj, 2 i B – TiN sloj

TiN i TiAlN prevlake naneseene su PVD postupkom raspršavanja magnetskim poljem. Zagrijavanje na temperaturu prevlačenja od 450°C je trajalo 1 h dok je samo nanošenje trajalo 2,5 h. Prije samog prevlačenja u uređaju je provedeno još i ionsko nagrivanje u trajanju od 30 min pri čemu je s površine odstranjen sloj debljine oko 0,1 μm .

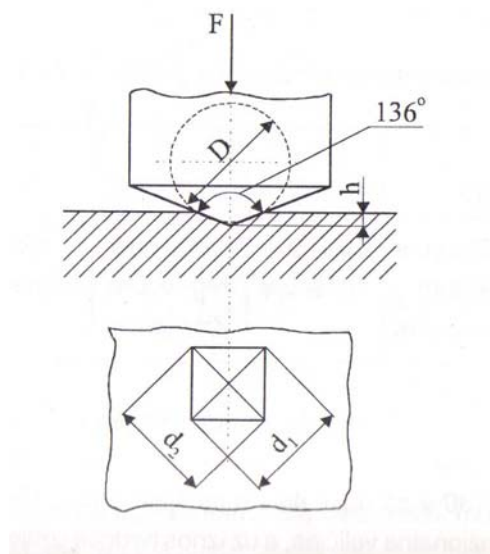
6.1. Tvrdoća po Vickersu

Tvrdoća je otpornost materijala prema prodiranju drugog, znatnije tvrdog tijela. Prvu metodu za mjerenje tvrdoće razvio je Mohs još početkom 19. stoljeća gdje su materijali svrstani u 10 razreda no vrijedi samo za minerale. Za mjerenje tvrdoće tehničkih materijala razvijen je čitav niz metoda ispitivanja. Ispitivanje tvrdoće je vjerojatno najčešće upotrebljavano ispitivanje nekog mehaničkog svojstva, tek neznatno oštećuje površinu ispitivanog predmeta pa se općenito može svrstati među nerazorna ispitivanja.

Za samo ispitivanje ne treba izraditi posebnu epruvetu, nego samo odgovarajuće pripremiti plohe uzorka ili strojnog dijela. Uređaji za mjerenje tvrdoće, tvrdomjeri, u pravilu su jednostavniji i jeftiniji od nekih drugih uređaja za ispitivanje mehaničkih svojstava. Osnovni princip mjerenja kod većine metoda je mjerenje veličine ili dubine otiska što ga penetrator, opterećen nekom silom, načini u ispitivanom materijalu.

Te su metode pogodne za ispitivanje tvrdoće metalnih materijala kod kojih je moguća plastična deformacija. Kod materijala koji imaju vrlo malu ili nikakvu mogućnost plastične deformacije razvili su se postupci mjerenja tvrdoće pri čemu se deformacija materijala mjeri u trenutku djelovanja sile. Kod Vickersove metode ispitivanja tvrdoće kao penetrator se koristi dijamant oblika četverostrane piramide s kutem od 136° između stranica, slika 21.

Kut od 136° nije odabran slučajno. Taj kut zatvaraju tangencijalne ravnine na Brinellovu kuglicu pro optimalnoj veličini otisnuća $d=0,375D$. Naime, ispitivanje putem Brinellove metode vrši se utiskivanjem kuglice od kaljenog čelika promjera D silom F u površinske slojeve materijala.



Slika 21. Mjerenje tvrdoće po Vickersu, [11]

F – opterećenje, D – promjer Brinellove kuglice, h – dubina otiska, d_1 i d_2 – dijagonale otiska

Po definiciji, tvrdoća po Vickersu jednaka je onoj Brinellovoj, a izračunava se prema izrazu:

$$HV = \frac{F \cdot 0,102}{S}, \quad (1)$$

pri čemu je F , N, sila, a S , mm², površina otiska šuplje piramide nakon rasterećenja.

Budući da se mjeri dijagonala baze otiska (kvadrata), površina otiska izražava se pomoću dijagonale „ d “ te iz toga proizlazi:

$$HV = \frac{F \cdot 0,188}{d^2}, \quad (2)$$

pri čemu je F , N, sila, a d srednja vrijednost od dvije izmjerene dijagonale.

Uobičajeni iznosi sile kod Vickersove metode iznose od 49-980 N. No kod Vickersove metode koriste se i niža opterećenja. Ukoliko primjenjena sila utiskivanja iznosi od 1,96-49 N, govori se o semimikrotvrdoći. Mjerenje semimikrotvrdoće provodi se prvenstveno pri ispitivanju tvrdoće tankih uzoraka te tankih slojeva. Za mjerenje tzv. mikrotvrdoće koriste se opterećenja niža od 1,96 N. Na taj način moguće je mjerenje tvrdoća pojedinih faza, npr. kristalnih zrna u mikrostrukturi materijala. Trajanje opterećivanja penetratora iznosi od 10-15 s, a iznimno se za mekane materijale može i produljiti.

Vickersova tvrdoća je bezdimenzionalna veličina, a uz iznos tvrdoće navodi se i sila opterećivanja. Minimalna debljina uzorka u pravilu iznosi $(1,2-1,5)d$ gdje je d dijagonala otiska. Kod Vickersove metode je potrebna brižljiva priprema mjerne površine koja pogotovo za mjerenje semimikrotvrdoće i mikrotvrdoće uključuje i poliranje uzorka. Također je za mjerenje dijagonale potreban mjerni mikroskop, [11].

6.2. Rezultati mjerenja tvrdoće

Mjerenje tvrdoće je provedeno na tvrdomjeru Indentec (koji je ujedno i referentni etalon tvrdoće) po normi ISO 6507-1 na Fakultetu strojarstva i brodogradnje u Zagrebu. Provedeno je pet mjerenja tvrdoće na osnovnom materijalu matrice koja je izrađena od tvrdog metala. Dobiveni rezultati se mogu vidjeti u tablici 1.

Tablica 1. Rezultati mjerenja tvrdoće

	Tvrđi metal – HV20
1	1271,3
2	1283,2
3	1286,3
4	1290,8
5	1280,2
\overline{HV}	1282,36

Tvrdoća nanese TiN tanke tvrde prevlake iznosi oko 2 300 HV dok tvrdoća TiAlN prevlake iznosi oko 2 800 HV.

Prema dobivenim rezultatima vidljivo je kako nanešena tanka tvrda prevlaka daje gotovo dvostruko veće iznose tvrdoće u odnosu na tvrdi metal dok kao posljedicu daje približno dvostruko veću trajnost alata.

6.3. Skenirajuća elektronska mikroskopija (SEM)

Skenirajući elektronski mikroskop je jedan od svestranijih instrumenata za istraživanje mikrostrukture metalnih materijala. U usporedbi s optičkim mikroskopom ima povećanu rezoluciju do jednog reda veličine, tj. do približno 10 nm na uobičajenim uređajima u praksi. Tako se korisno povećanje kreće između 10 000:1 i 100 000:1 time zatvarajući jaz između optičkog mikroskopa i transmisijskog elektronskog mikroskopa.

Konvencionalni skenirajući mikroskop zahtjeva da uzorak bude električki vodljiv kako bi se spriječilo nakupljanje naboja na uzorku što bi utjecalo na dolazeće primarne i emitirane sekundarne elektrone. Nakupljanje naboja bi rezultiralo slabom, iskrivljenom slikom koja bi se konstantno mijenjala u kontrastu i lokaciji, [12].

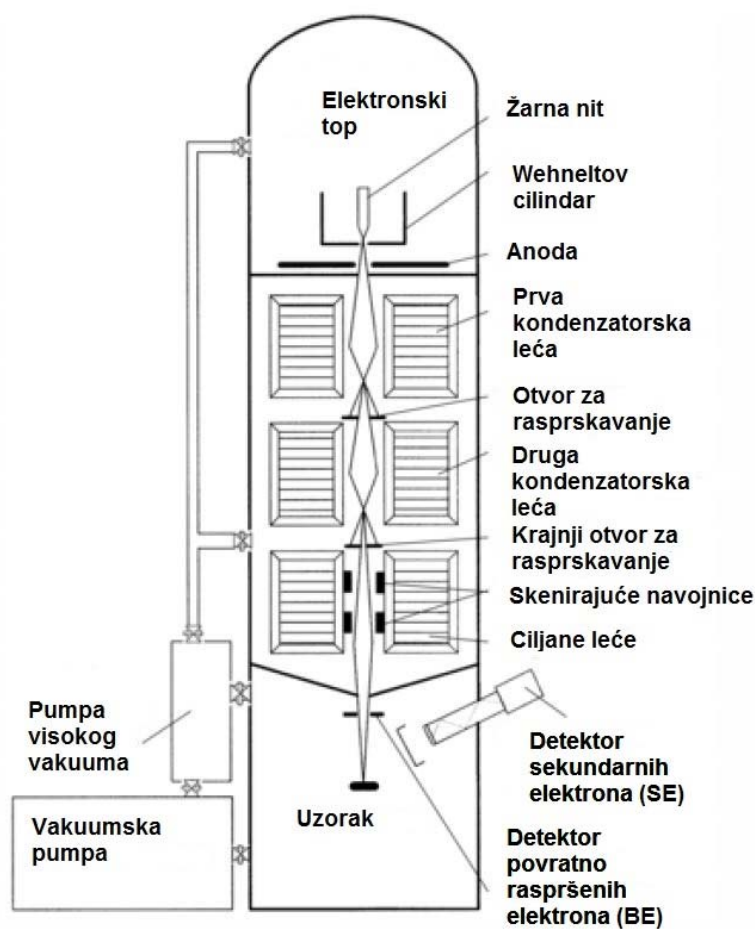
6.3.1. Priprema uzorka

Priprema uzoraka koji će biti promatrani koristeći skenirajući elektronski mikroskop doživjela je revoluciju u novije vrijeme uvodeći skenirajuće mikroskope s niskim tlakom. Prethodno njihovom uvođenju uzorci su morali biti električni vodljivi kako bi se omogućilo odvođenje elektrona od snopa te na taj način spriječilo nabijanje uzorka i stvaranje loše slike. Uzorci moraju biti suhi kako bi se održala razina vakuuma u komori za uzorke te spriječilo nastajanje plinova koji bi raspršivali snop elektrona te samim time stvarajući lošu sliku.

U slučaju promatranja električki nevodljivih uzoraka konvencionalnim skenirajućim mikroskopom postoje određene metode kako bi se dobio vodljivi sloj na površini uzorka. Dvije najčešće korištene metode su nanošenje obloga isparavanjem i naštrcavanjem. S obje navedene metode na površini uzorka nastaje nekoliko monoslojeva metala po cijeloj površini uzorka, [12].

6.3.2. Dijelovi skenirajućeg elektronskog mikroskopa

Glavni dijelovi skenirajućeg elektronskog mikroskopa su: elektronski top, kolona za formiranje ispitivanja (sastoji se od magnetskih elektronskih leća, prskalica i skenirajućih navojnica), detektora elektrona i vakuumskog sustava, kao što je prikazano na slici 22.



Slika 22. Shematski prikaz skenirajućeg elektronskog mikroskopa, [13]

Elektroni se generiraju termoioničkim zračenjem ili električnim poljem koji se ubrzavaju prema uzorku. Najčešće korištena vrsta elektronskog topa se sastoji od volframove žarne niti koja služi kao katoda. Anoda se sastoji od uzemljene ploče s otvorom koji propušta elektrone. Napon ubrzavanja obično varira između 1-50kV. Treća elektroda (Wehneltov cilindar) s negativnom naponom polarizacije od nekoliko stotina volti (u odnosu na katodu) se uvodi kako bi se ograničilo područje zračenja na vrh volframove elektrode.

Magnetske elektronske leće se koriste kako bi se umanjila slika izvora elektrona na krajnju točku veličine površine uzorka. U većini slučajeva se koriste tri leće kako bi se postiglo traženo umanjenje. Raspršivači su postavljeni između leća kako bi se ograničio promjer snopa. Kako bi se pomicao snop elektrona preko uzorka postavljena su dva kompleta skenirajućih navojnica unutar provrta ciljanih leća.

Elektronski top te kolona moraju biti vakuumirani kako bi se izbjeglo oštećivanje izvora elektrona te ispad visokonaponskog sklopa unutar topa. Također, visoki vakuum je potreban kako bi se smanjilo raspršivanje elektrona tijekom njihovog puta od topa do površine uzorka.

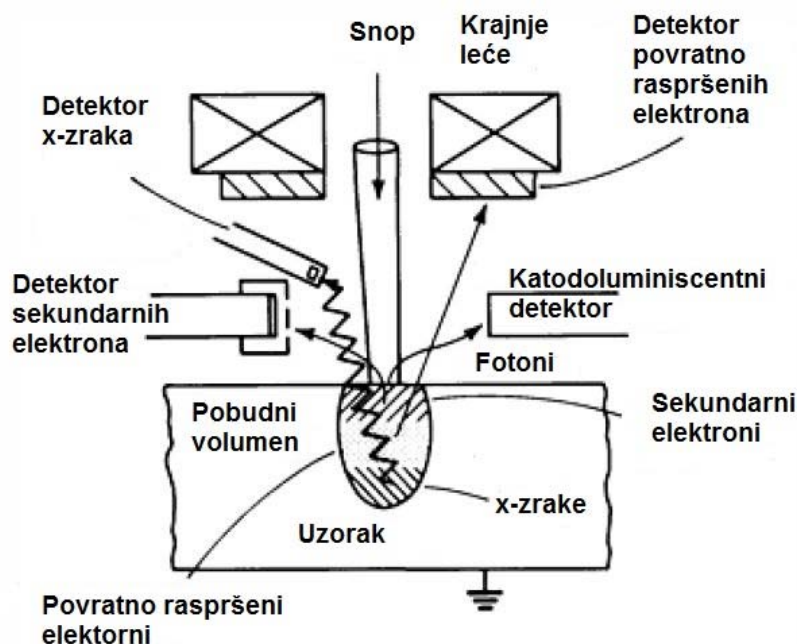
Najčešće korišteni detektor elektrona u skenirajućim elektronskim mikroskopima je Everhart-Thornley detektor koji se sastoji od scintilatora, koji prilikom bombardiranja elektronima, proizvodi fotone. Fotoni se konvertiraju u električni signal pomoću fotomultiplikatora. Everhart-Thornley detektor se može koristiti kao detektor za sekundarno emitirane elektrone (secondary electron, SE), ali i kao detektor za povratno raspršene elektrone (backscattered electron, BE).

Kao dodatak glavnim dijelovima skenirajućeg elektronskog mikroskopa koji su prethodno opisani većina uređaja je opremljena i sa detektorom energetski raspršenih x-zraka (energy-dispersive spectroscopy, EDS). Spektroskopija energetski raspršenih x-zraka (EDS) omogućuje kvalitativnu i kvantitativnu kemijsku analizu elemenata s atomskim brojem iznad 5, [13].

6.3.3. Stvaranje slike

Sa ozračenog uzorka se istovremeno otpuštaju različiti signali koji se prisutstvom odgovarajućih detektora mogu analizirati. Podatkovni signal nastaje ili iz elastičnog ili iz neelastičnog sudara. Elastični sudar daje povratno raspršene elektrone koji nose topografske i kompozicijske podatke. Neelastični sudar nanosi energiju unutar uzorka koji se onda vraćaju u nepobuđeno stanje oslobađanjem sekundarnih elektrona, x-zraka i toplinske fonone.

Važna razlika između sekundarnih i povratno raspršenih elektrona je njihova relativna energija, povratno raspršeni elektroni zadržavaju 80% energije snopa dok su sekundarni elektroni niske energije. Prema tome, povratno raspršeni elektroni putuju pravocrtno i detektirani su samo ako su presretnuti detektorom elektrona. Sekundarni elektroni se privlače prema detektoru pomoću pozitivno nabijenog Faradeyovog kaveza te na taj način imaju zakrivljenu putanju. Shematski prikaz izvora i detektiranja signala se može vidjeti na slici 23.



Slika 23. Izvor i detektiranje podatkovnih signala, [14]

Prednost razlikovanja između sekundarnih i površno raspršenih elektrona je ta da se potonji mogu koristiti za slikovnu dijagnostiku atomskog broja; broj površno raspršenih elektrona reflektiranih od uzorka povećava se s atomskom masom. Ovo je snažna tehnika koja se koristi u sprezi s analizom x-zraka.

Geometrija uzorka, optička os i detektori utječu na prikupljanje podataka. Uzorkom se upravlja pomoću nagiba oko x, y i z osi te rotacijskim kontrolama. Velika radna udaljenost povećava dubinu polja te smanjuje donju granicu povećanja, obrnuto vrijedi za malu radnu udaljenost.

Na jasnoću slike utječe nagib uzorka. Prikupljanje sekundarnih elektrona i x-zraka može se povećati nagnjanjem uzorka prema detektoru. Optimalni kut ovisi o topografiji uzorka te općenito vrijedi da su veći kutevi potrebni za glađe uzorke, [14].

Spektroskopija energetskog raspšivanja x-zraka (EDS) je najčešće korištena analitička metoda za određivanje kemijskog sastava uzorka te se zasniva na istraživanju interakcija izvora x-zraka i uzorka. Njene karakterizacijske sposobnosti se temelje velikim dijelom na fundamentalnom principu da svaki element ima jedinstvenu atomsku strukturu dajući jedinstveni niz vrhova na njegovom spektru x-zraka.

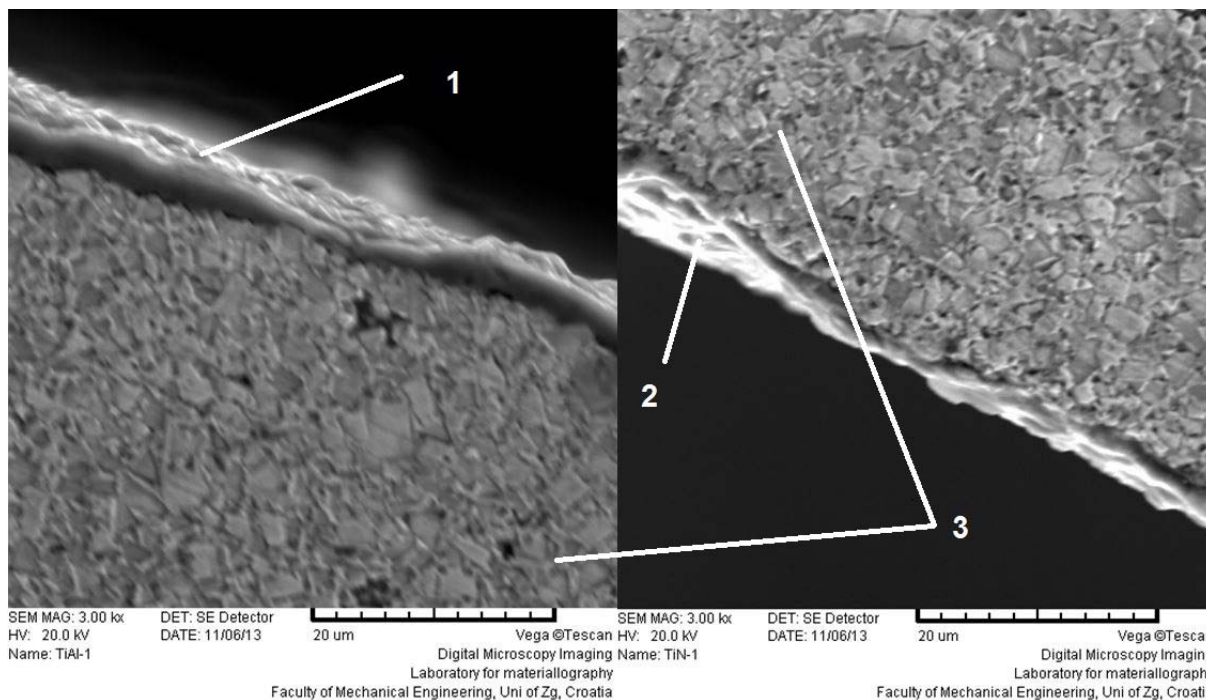
Zračenje karakterističnih x-zraka sa uzorka postiže se visokoenergetskim snopom nabijenih elektrona fokusiranih na proučavani uzorak. Atom na uzorku sadrži elektrone u nepobuđenom stanju u elektronskoj ljusci vezan za ljusku. Snop pobuđuje elektrone u unutarnjoj ljusci izbacujući ga iz ljuske tako stvarajući elektronsku prazninu gdje je bio elektron. Elektron iz vanjske ljuske više energije tada popunjava prazninu, a razlika u energiji između ljusaka više i niže energije se oslobađa u obliku x-zraka. Broj i energija x-zraka emitiranih s uzorka mjeri se spektrometrom raspršene energije (EDS). Budući da je energija x-zraka karakteristična za energiju između dvije ljuske i atomsku strukturu elementa s kojega su emitirane na taj način omogućeno je određivanje kemijskog sastava, [15].

6.4. SEM analiza

Prilikom analize uzoraka skenirajućim elektronskim mikroskopom korišten je uređaj Vega Tescan 5136MM dok je za određivanje kemijskog sastava uzoraka korišten INCA x-sight modul.

6.4.1. Kemijski sastav

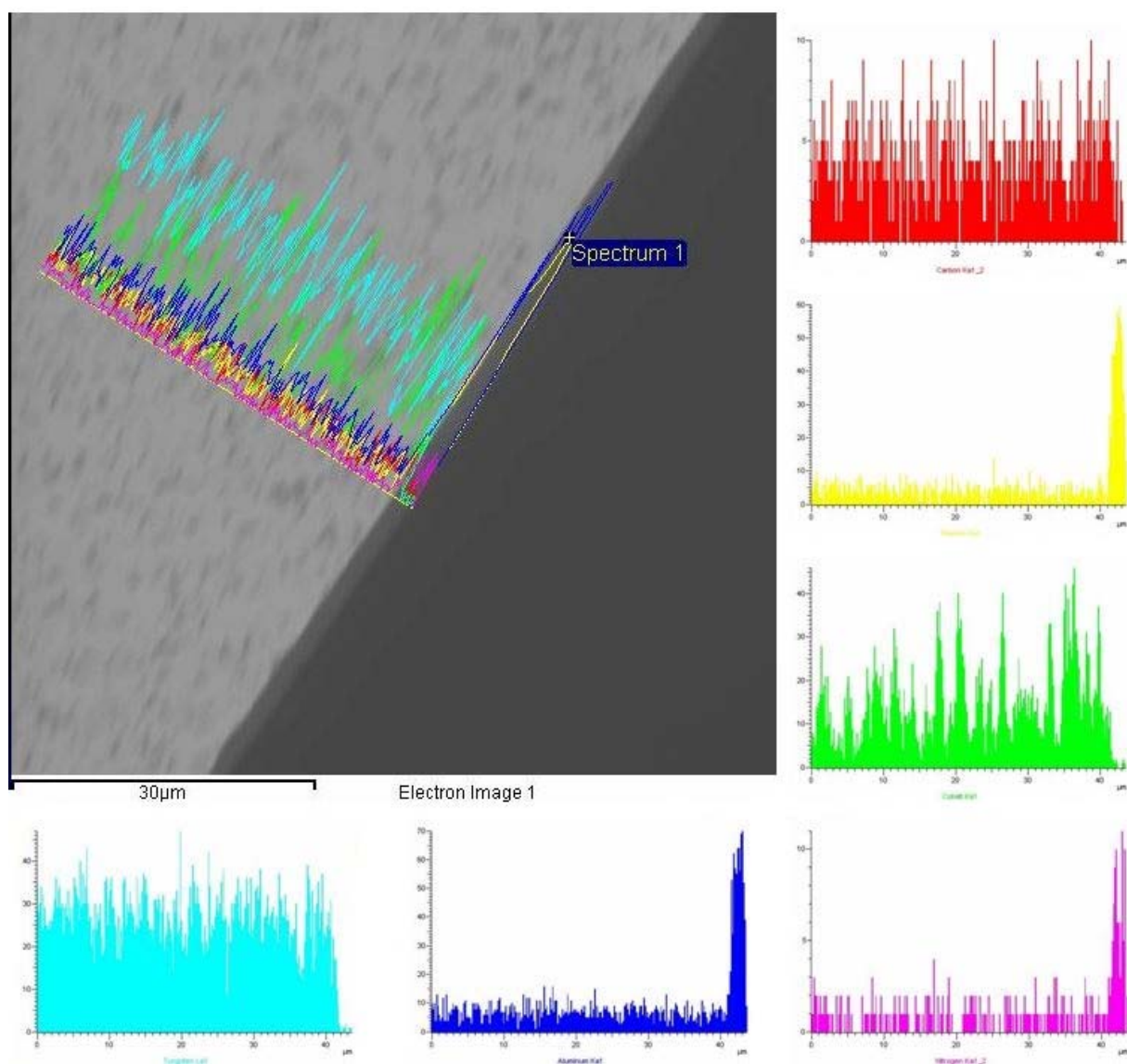
Prije EDS analize nanese tanki tvrdi sloj je pregledan pod povećanjem od 3000:1 gdje se jasno može razabrati reljefni prikaz osnovnog materijala (1) na koji je nanesena prevlaka (2 i 3), slika 24.



Slika 24. Reljefni prikaz mikrostrukture putem SEM-a

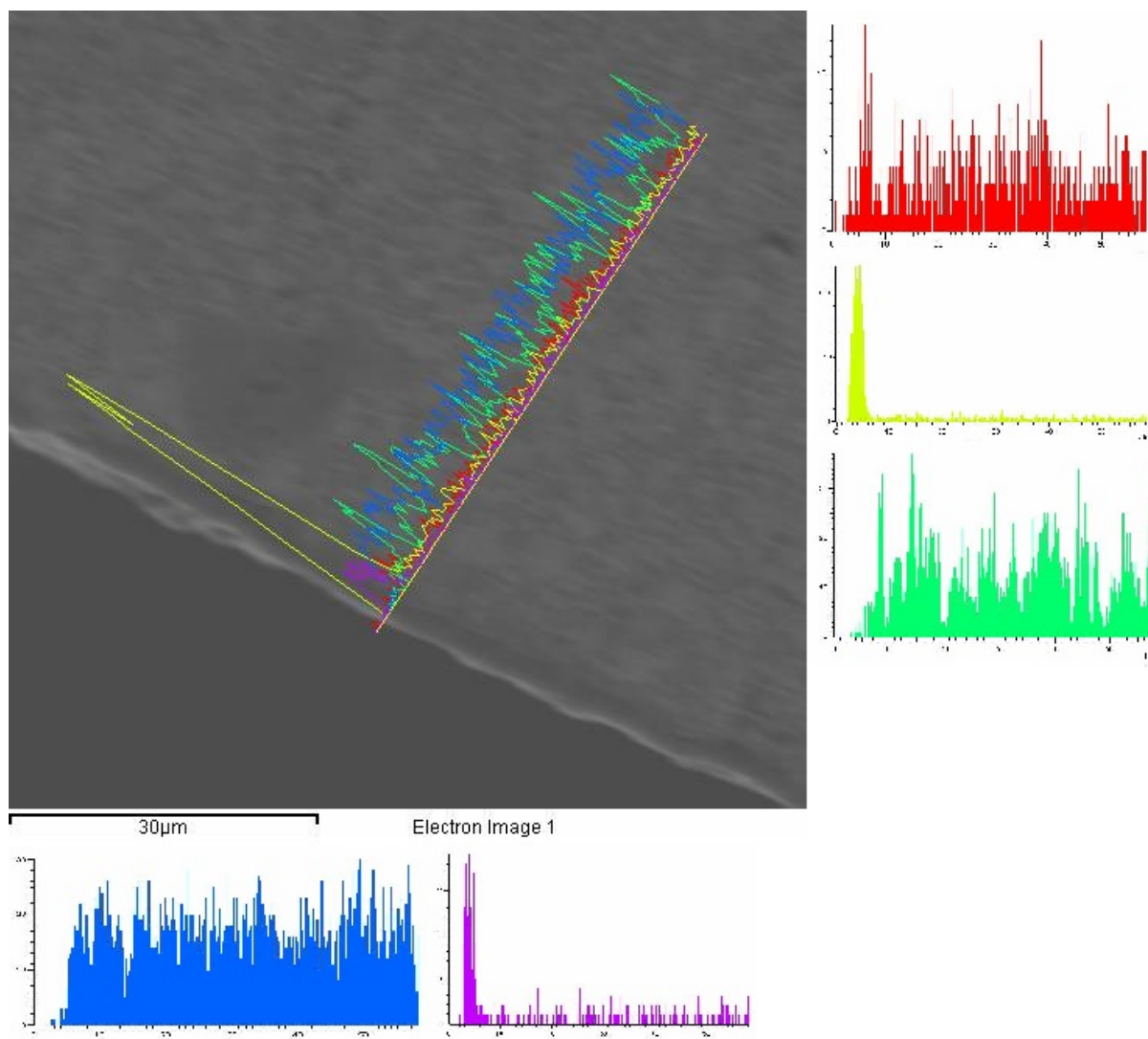
1 – TiAlN prevlaka, 2 – TiN prevlaka, 3 – tvrdi metal

Kemijski sastav uzorka se određuje pomoću spektroskopije energetskeg raspršivanja x-zraka (EDS). Tako se na slici 25 može vidjeti kako se mijenja kemijski sastav uzorka povučenog od ruba uzorka prema sredini gdje je s crvenom bojom označen ugljik, žutom titan, zelenom kobalt, modrom volfram, plavom aluminij i ljubičastom dušik. Iz slike se jasno vidi kako je kemijski sastav raspodjeljen na način da je najveća koncentracija titana, aluminija i dušika na samom rubu uzorka dok se ostali kemijski elementi, karakteristični za tvrdi metal, prisutni tek ispod površinski nanesenog sloja. Iz navedenoga se da zaključiti kako je na ovaj promatrani uzorak nanescena TiAlN prevlaka na osnovu od tvrdog metala.



Slika 25. Linijska EDS analiza uzorka s TiAlN prevlakom

Identična analiza je provedena i na drugom uzorku gdje je crvenom bojom označen ugljik, žutom titan, zelenom kobalt, plavom volfram i ljubičastom dušik, slika 26. Kao i u prethodnom slučaju i ovdje je jasno vidljivo te lako za zaključiti po rasporedu kemijskih elemenata kako je riječ o nanesejoj TiN prevlaci na osnovni materijal od tvrdog metala.



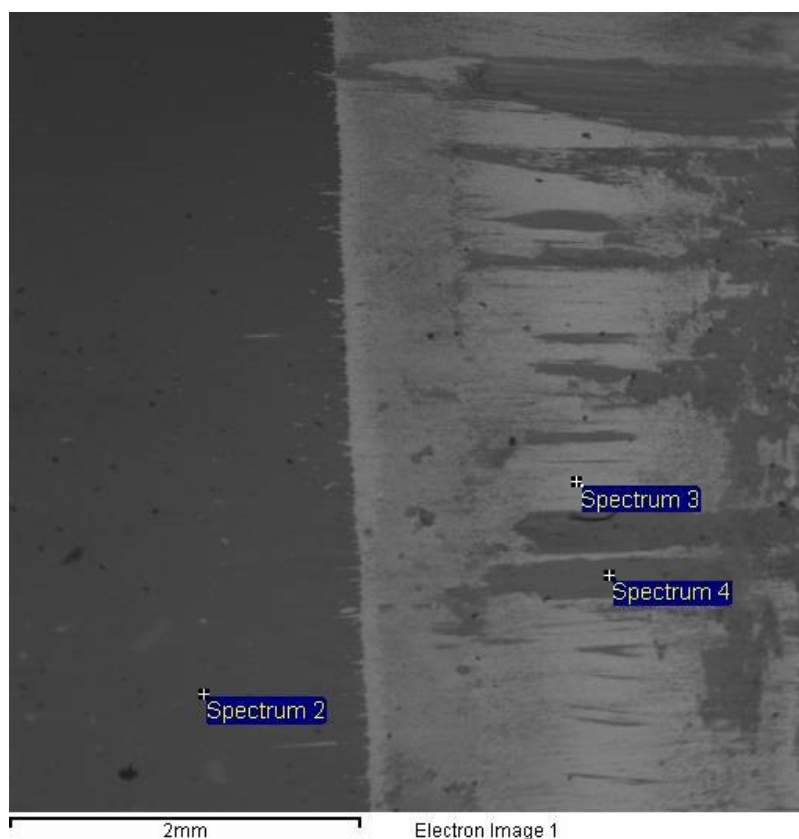
Slika 26. Linijska EDS analiza uzorka s TiN prevlakom

6.4.2. Trošenje

Provedena analiza iz prethodnog poglavlja izvedena je uzduž proizvoljno povučene linije po presjeku izrezanih uzoraka. Sva daljnja analiza provedena je na površini uzorka što kao posljedicu ima pojavu i drugih kemijskih elemenata osim onih koji su deklarirani od strane proizvođača odnosno tvrtke koja je nanosila tanku tvrdu prevlaku.

6.4.2.1. Trošenje matrice

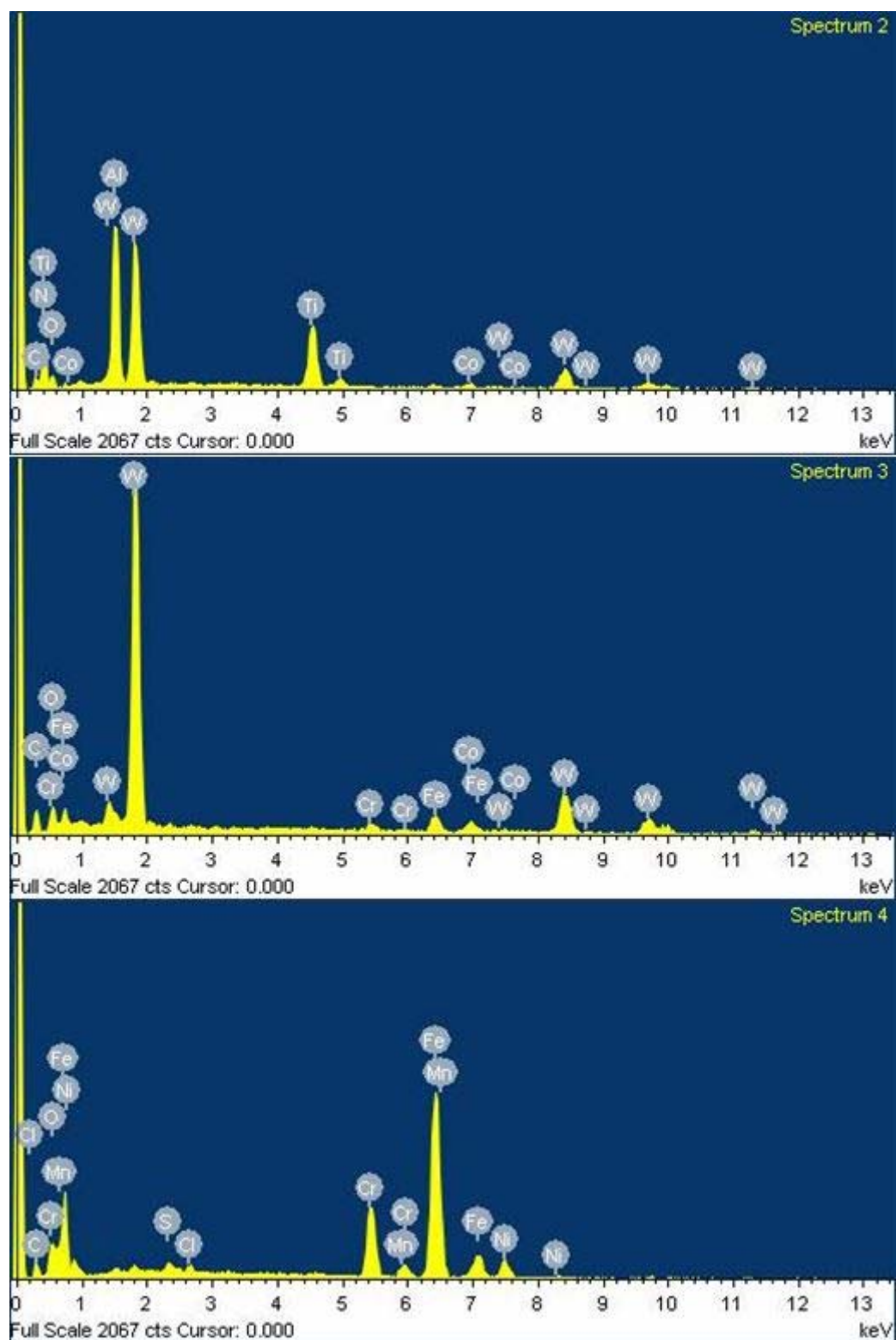
Kako bi se došlo do rezultata trošenja matrica putem skenirajućeg elektronskog mikroskopa pregledano je mjesto na kojemu se nalazi suženje (detalj A, slika 19), odnosno na mjestu na kojemu dolazi do promjene promjera cijevi. EDS analiza je provedena na tri različita mjesta: neposredno prije suženja te na dva mjesta gdje je vidljiva razlika u površini uzorka, slika 27.



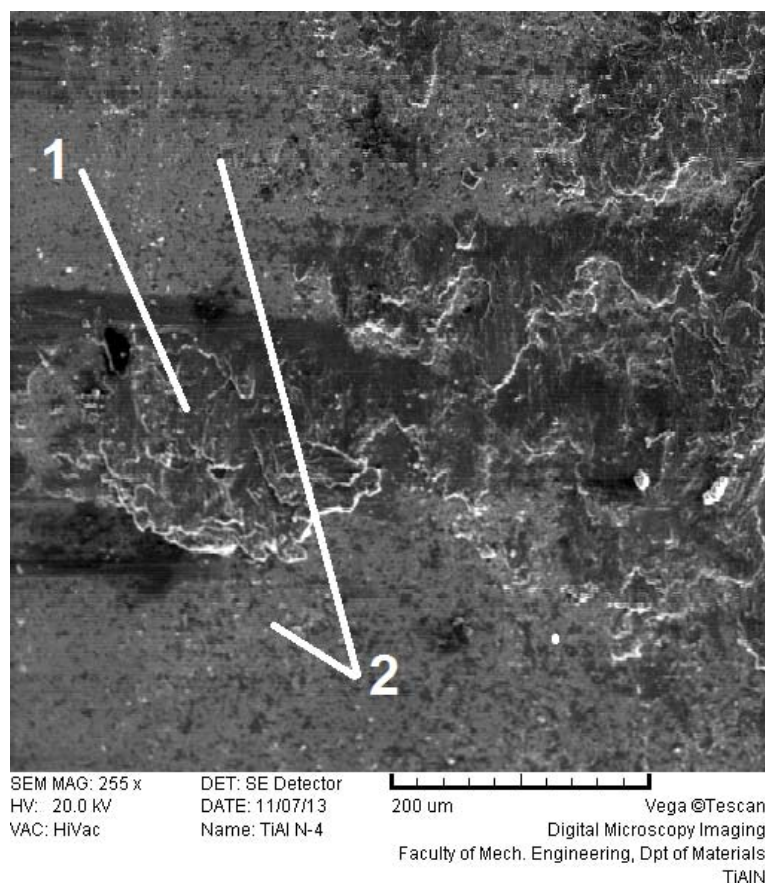
Slika 27. EDS analiza uzorka s TiAlN prevlakom

Dobiveni kemijski sastavi se mogu vidjeti na slici 28. Uzimajući u obzir činjenicu da su matrice obilno poljevano uljem za vrijeme provlačenja cijevi te moguću prisutnost raznih nečistoća mogu se izvući slijedeći zaključci: u spektru 2 je riječ o djelomično potrošenoj tankoj tvrdoj prevlaci, na mjestu spektra 3 tanka tvrda prevlaka je potpuno potrošena te je riječ o osnovnom materijalu od tvrdog metala i na mjestu spektra 4 vide se nanosi materijala cijevi koji su tamo došli mikrozavarivanjem tijekom provlačenja cijevi.

Prikaz trošenja matrice te nanoseni materijal cijevi jako dobro se može vidjeti pri povećanju od 255:1 na slici 29.



Slika 28. Kemijski sastav uzorka s TiAlN prevlakom



Slika 29. Oštećenje matrice s TiAlN prevlakom

1 – adhezijom naneseeni sloj cijevi na matricu, 2 – matrica

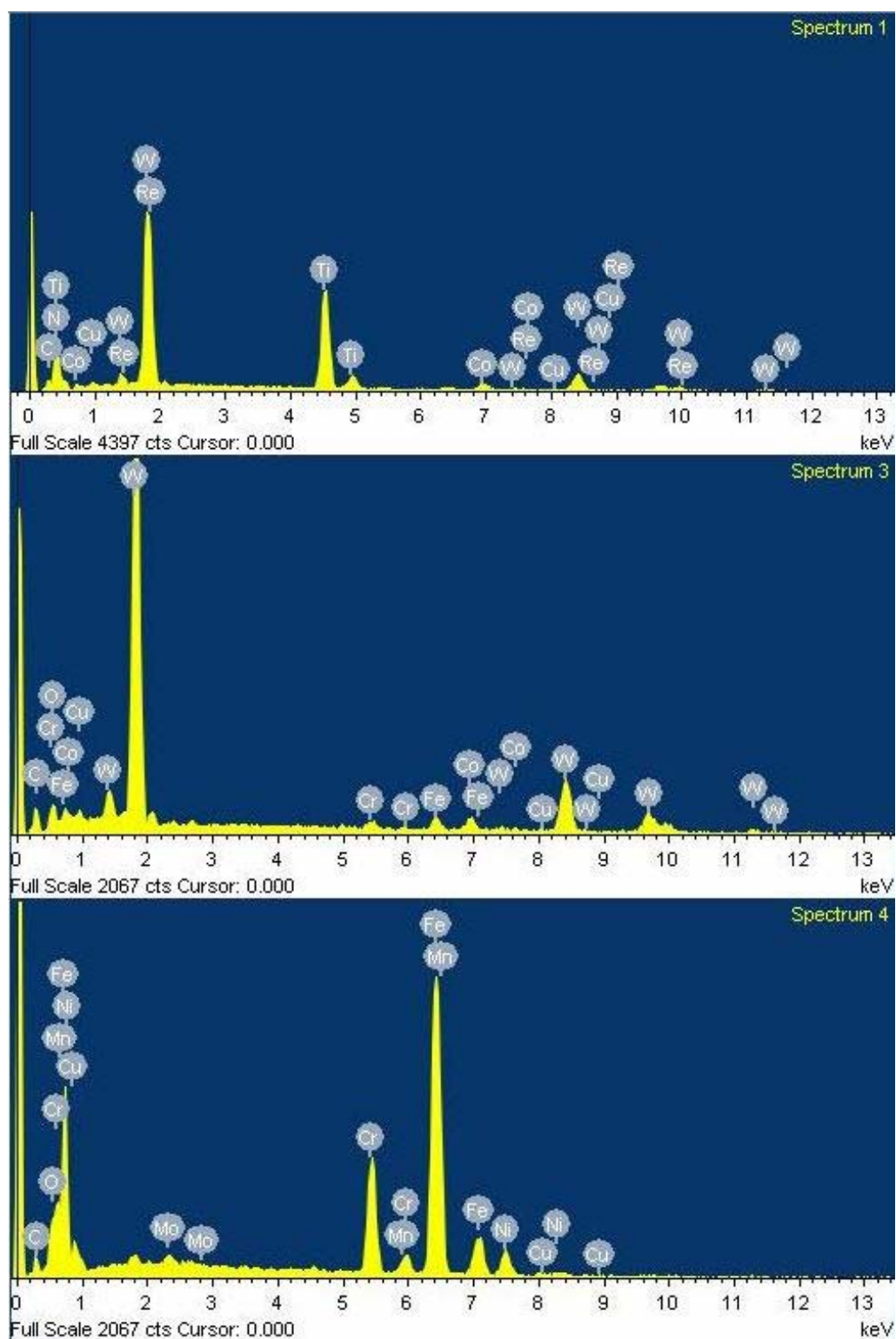
Kako bi se moglo usporediti trošenje matrice s TiAlN identični pregled je proveden i na matrici s TiN prevlakom slijedeći isti princip (detalj B, slika 19). Prema tome se na slici 30 mogu vidjeti točke na uzorku koje su odabrane za EDS analizu.



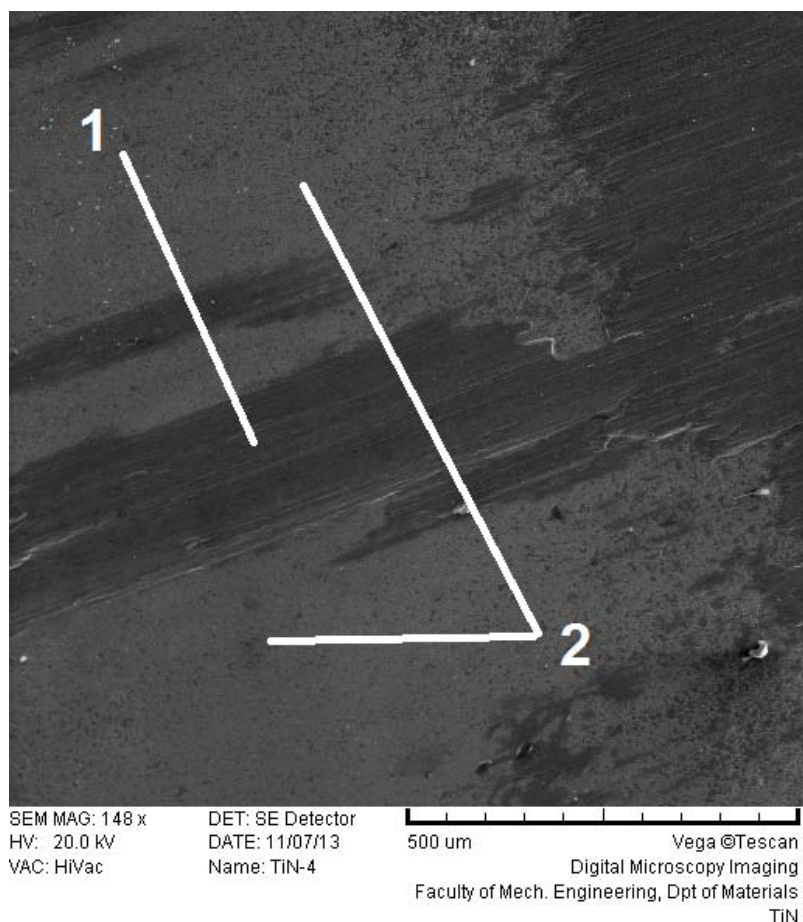
Slika 30. EDS analiza uzorka s TiN prevlakom

Dobiveni kemijski sastavi se mogu vidjeti na slici 31. Kao i u prethodnom slučaju i za matricu s TiN prevlakom mogu se izvući slijedeći zaključci: u spektru 1 je riječ o djelomično potrošenoj tankoj tvrdoj prevlaci, na mjestu spektra 3 tanka tvrda prevlaka je potpuno potrošena te je riječ o osnovnom materijalu od tvrdog metala i na mjestu spektra 4 vide se nanosi materijala cijevi koji su tamo došli mikrozavarivanjem tijekom provlačenja cijevi, identično kao i u slučaju s matricom s TiAlN prevlakom.

Prikaz trošenja matrice te nanoseni materijal cijevi jako dobro se može vidjeti pri povećanju od 148:1 na slici 32.



Slika 31. Kemijski sastav uzorka s TiN prevlakom



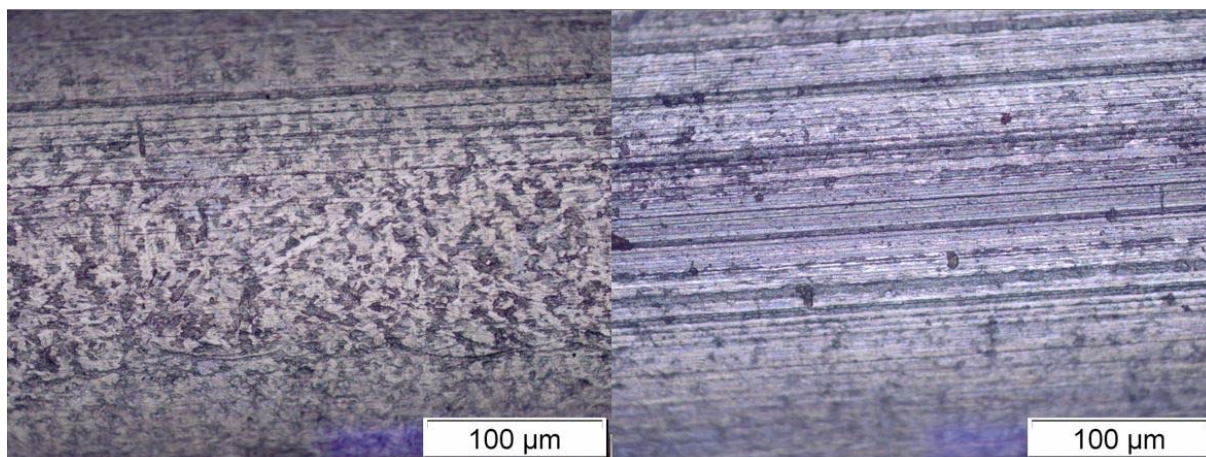
Slika 32. Oštećenje matrice s TiN prevlakom

1 – adhezijom naneseeni sloj cijevi na matricu, 2 – matrica

Usporedbom promatranih uzoraka vidljivo je kako je riječ o identičnom načinu oštećivanja korištenih matrica.

6.4.2.2. Oštećenje cijevi

Cijevi se provlače kroz matrice s ciljem smanjenja promjera. Budući da dolazi do dodira metal/metal uz prisutnost maziva i raznih nečistoća na cijevima nakon provlačenja su također vidljivi tragovi trošenja što se može vidjeti na slici 33 snimljenoj na svjetlosnom mikroskopu pri povećanju od 100:1.



Slika 33. Tragovi trošenja na cijevima

Na lijevoj slici su prikazani tragovi trošenja na cijevi koja je bila provučena kroz matricu s TiAlN prevlakom dok su na desnoj slici prikazani tragovi trošenja na cijevi koja je bila provučena kroz matricu s TiN prevlakom.

7. ZAKLJUČAK

Mjerenjem tvrdoće vidljivo je da je tvrdoća tankih tvrdih prevlaka gotovo dvostruko veće vrijednosti u odnosu na tvrdi metal. Iz navedenoga je očito da za samo provlačenje cijevi povećana tvrdoća materijala površine matrice daje značajan utjecaj zbog čega u prvi plan dolazi svojstvo otpornosti na trošenje nanesenog tankog tvrdog sloja.

Proučavanjem matrica putem skenirajućeg elektronskog mikroskopa uočeno je, kao što je bilo i za očekivati, značajno trošenje nanesene prevlake na radnom mjestu te adhezijom naneseni slojevi cijevi na matricu, neznatno iza radnog mjesta, što je potvrđeno kemijskim sastavom dobivenim putem EDS analize.

U tijeku eksploatacije je uočeno kako obje matrice s tankom tvrdom prevlakom imaju približno jednaku trajnost (400 000 m provučene cijevi) koja je dvostruko veća u odnosu na matricu izrađenu od tvrdog metala bez ikakvih prevlaka (200 000 m provučene cijevi).

LITERATURA

- [1] <http://www.oprema-uredjaji.com/>.
- [2] Filetin T., Kovačiček F., Indof J.: Svojstva i primjena materijala, FSB Zagreb 2011.
- [3] Oprema-uređaji d.d. – interna dokumentacija
- [4] Gojić M.: Tehnike spajanja i razdvajanja materijala, Sisak: Metalurški fakultet, 2003.
- [5] Krumes D.: Toplinska obradba, Slavonski brod: Strojarski fakultet, 2000.
- [6] Križan, B.: Osnove proračuna i oblikovanja konstrukcijskih elemenata, Rijeka: Tehnički fakultet, 1998.
- [7] Grilec – Ivušić: Tribologija, autorizirana predavanja
- [8] Gojić, M.: Površinska obradba materijala, Sisak: Metalurški fakultet, 2010.
- [9] Filetin – Grilec: Postupci modificiranja i prevlačenja površina, FSB Zagreb, 2004.
- [10] ASM handbook, volume 5: Surface engineering, ASM international, 1994.
- [11] Franz M.: Mehanička svojstva materijala, FSB Zagreb, 1998.
- [12] ASM handbook, volume 11: Failure analysis and prevention, ASM international, 1994.
- [13] ASM handbook, volume 9: Metallography and microstructures, ASM international, 1994.
- [14] ASM handbook, volume 12: Fractography, ASM international, 1994.
- [15] Goldstein, J.: Scanning electron microscopy and x-ray microanalysis, Springer, 2003.